

Le séchage des mangues

Michel Rivier, Jean-Michel Méot,
Thierry Ferré et Mathieu Briard

éditions Quæ

Le séchage des mangues

Michel Rivier, Jean-Michel Méot,
Thierry Ferré et Mathieu Briard

Éditions Quæ, CTA

Collection *Guide pratique*
Derniers titres parus

Les orchidées sauvages de Paris
Sébastien Lesné, coordinateur
2009

Mise en place de la redevance incitative du service public
d'élimination des déchets
André Le Bozec
2008

Manuel de l'évaluation des politiques publiques
Dominique Vollet, Farid Hadjab
2008

Poissons de l'océan Indien et de la mer Rouge
Marc Taquet, Alain Diringer
2007

Traitement des effluents d'élevage des petites et moyennes exploitations
Guide technique à l'usage des concepteurs, bureaux d'études et exploitants
Colin Burton, Vincent Jaouen, José Martinez
2007

Alimentation des bovins, ovins et caprins
Besoins des animaux - Valeurs des aliments
Tables Inra 2007
2007

Les végétations d'alpage de la Vanoise. Description agro-écologique et gestion pastorale
André Bornard, Mauro Bassignana, Claude Bernard-Brunet,
Sophie Labonne, Philipe Cozic
2007

Éditions Quæ
RD 10
F- 78026 Versailles Cedex
www.quae.com

CTA
Postbus 380
6700 AJ Wageningen – Pays-Bas
www.cta.int

e-ISBN (Quæ) : 978-2-7592-0342-0
ISBN (CTA) : 978-92-9081-421-4

À propos du CTA

Le Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale (CTA) a été créé en 1983 dans le cadre de la Convention de Lomé signée entre les États du groupe ACP (Afrique, Caraïbes, Pacifique) et les États membres de l'Union Européenne. Depuis 2000, le CTA opère dans le cadre de l'Accord de Cotonou ACP-UE. Le CTA a pour mission de développer et de fournir des produits et des services qui améliorent l'accès des pays ACP à l'information pour le développement agricole et rural. Le CTA a également pour mission de renforcer les capacités des pays ACP à acquérir, traiter, produire et diffuser de l'information pour le développement agricole et rural.

Le CTA est financé par l'Union Européenne.



partageons les connaissances au profit des communautés rurales

sharing knowledge, improving rural livelihoods

Remerciements

Les auteurs de cet ouvrage remercient toutes les personnes qui ont participé à son élaboration et plus particulièrement Isabelle Bonnevie, Christine Rawski, Laurence Rodriguez, Martine Séguier-Guis et Jacques Brouat.

Avant-propos

La transformation de la mangue sous forme de tranches de mangue séchée est une voie de valorisation de ce fruit. Elle s'est développée en Afrique de l'Ouest depuis le début des années 1980, en particulier au Burkina Faso. Ce pays est considéré comme le pionnier de cette filière agroalimentaire. Les premières unités de séchage se sont alors installées avec le soutien des pouvoirs publics et des ONG du Nord, en visant puis captant un marché d'exportation vers l'Europe. Les transformateurs se sont très vite réunis autour de groupements de sécheurs.

Les acteurs de la filière ont pris conscience des exigences contraignantes et sans cesse renouvelées du marché, et en 2003, ils ont sollicité la Chambre de commerce et d'industrie du Burkina Faso (CCI-BF) pour demander un appui à la structuration de la filière mangue séchée et au renforcement des capacités.

C'est ainsi qu'un projet financé par la CCI-BF et les ambassades du Danemark et de France à Ouagadougou a pu être initié de façon collective, puis mené au cours des années 2004 et 2005 par une équipe projet. Celle-ci était composée de la CCI-BF (et l'un de ses services, le bureau d'appui aux micro-entreprises), de l'Association technologie pour le développement (Tech-Dév), du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) et de l'Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE) de Ouagadougou.

Les résultats de ce projet ont été regroupés en 2005 dans un *Guide de l'entreprise de séchage de mangue au Burkina Faso*, publié et diffusé localement. Un des résultats contenus dans le guide était un séchoir à gaz à convection forcée qui, testé en situation de production, avait montré sa capacité à produire une très forte proportion de mangues séchées de qualité export, avec une consommation de gaz faible. Cependant, les principes techniques mis en œuvre demandaient pour le réglage final avant livraison des mesures et un savoir-faire rarement disponibles, limitant ainsi les chances de succès en cas de diffusion.

De 2006 à 2008, le Cirad a conduit des recherches pour dépasser ces limites.

Afin de répondre aux nombreuses demandes en Afrique de l'Ouest ou à l'échelle internationale sur la technologie de production de la mangue séchée, le Cirad a décidé de publier, avec le soutien du Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA), un guide, synthèse des deux phases d'études.

Il présente l'ensemble des étapes de l'activité de transformation, depuis l'approvisionnement en mangues jusqu'à la mise en marché du produit séché. Il aborde également la conception et la réalisation d'une unité de séchage de mangues, y compris des séchoirs dont les plans de fabrication sont donnés ; enfin, il décrit les bonnes pratiques à mettre en œuvre pour obtenir un produit sain, loyal et marchand apte à satisfaire les attentes du marché.

Le guide s'adresse à tous les responsables de petites et moyennes entreprises, entrepreneurs et porteurs de projets qui souhaitent développer une activité de séchage de mangue ou améliorer les conditions de fonctionnement de leur activité existante. Les renseignements qu'il contient seront aussi utiles à ceux qui sèchent ou souhaitent sécher d'autres végétaux à forte teneur en eau. Cet outil permettra également aux conseillers d'entreprises d'accompagner plus efficacement les opérateurs économiques dans le développement de leur entreprise.

Michel Rivier
Cirad

Félix Sanon
CCI Burkina Faso



Sommaire

Avant-propos 5

La filière de la mangue séchée
L'exemple du Burkina Faso 9

La production de mangue 9
Manguier 9
Mangue 9

L'organisation de la filière 11
Plantations familiales concentrées dans quelques régions 11
Développement des petites entreprises de séchage de mangues 11

Les marchés de la mangue séchée 12
Marché conventionnel européen des fruits tropicaux séchés 12
Marché européen des produits biologiques 13
Marché du commerce équitable 14

Transformation de la mangue 15

Les principales étapes de transformation 15
Prétraitement 15
Préparation des mangues 21
Traitements optionnels possibles 23
Séchage 25
Opérations post-séchage 33
Stockage des mangues séchées 35

Les équipements de séchage 35
Séchoir à gaz à convection naturelle 35
Fonctions que doit remplir un équipement de séchage de mangues 37
Propositions fonctionnelles pour un séchoir ventilé 39
Proposition d'un séchoir ventilé 42

Fiches techniques 45

Fiche 1. Mesures et unités de mesure dans l'élaboration de la mangue séchée 46
Humidité relative de l'air 46
Puissance calorifique d'un brûleur 46
Rendement énergétique du séchoir 47

Teneur en eau de la mangue 47
Rendement en pulpe de la mangue 48
Rendement de séchage 48
Rendement global de transformation 48
Quelques unités et valeurs utilisées 48

Fiche 2. Notion de disponibilité et d'activité de l'eau dans la mangue 49
Eau libre 49
Eau liée 49
Activité de l'eau 49
Séchage des mangues en trois phases 49

Fiche 3. Le brunissement de la mangue séchée 51
Brunissement enzymatique 51
Brunissement non enzymatique 51

Fiche 4. Notions de températures liées au séchage 52

Fiche 5. Humidité relative de l'air et teneur en eau des produits 53

Fiche 6. Techniques du séchage 54

Fiche 7. Pourquoi et quand recycler l'air dans un séchoir 55

Fiche 8. Mécanisme d'échange entre l'air et le produit – Notion de convection naturelle 56

Manuel de production 59
Préparation de campagne 60
Fiche de prévision de production 60

Gestion des stocks 62
Fiche de suivi de stock de matière première (mangues fraîches) 62
Fiche de suivi du stock de gaz 64
Fiche de suivi des emballages 66

Gestion de production 68
Fiche de suivi de production 68

Bilan de campagne 70
Fiche de synthèse de production 70

Annexe
Plans du séchoir ventilé 73

La filière de la mangue séchée

L'exemple du Burkina Faso

La production de mangue

Manguier

Le manguier appartient à la famille des Anacardiacées, du genre *Mangifera* L., regroupant 60 arborescences. L'une d'elle, *Mangifera indica,* comprendrait 1 000 variétés, et plus de 70 cultivars (greffage) présents sur divers continents.

C'est l'un des arbres fruitiers les plus cultivés au Burkina Faso. Il s'étend sur une superficie de près de 6 800 hectares sur les 12 000 hectares de verger que compte le pays. Avec un rendement moyen de 7 à 8 t/ha, la production nationale est de 47 600 à 54 400 tonnes.

Il pousse sur des sols sablo-limoneux, bien drainés et ayant un PH compris entre 5,5 et 6,5 ; le manguier préfère les sols profonds, assez légers ou de structure moyenne pour assurer une pénétration satisfaisante des racines, une bonne aération et un bon drainage.

La multiplication des manguiers s'effectue essentiellement par greffage, ce qui permet la conservation des caractères variétaux.

Pour la plantation, il est préconisé un espacement au carré de 10 m × 10 m en moyenne, soit une densité de 100 pieds par hectare. Selon les conditions pédoclimatiques, les espacements 8 m × 8 m ou 12 m × 12 m peuvent être réalisés.

Mangue

Après la saison des pluies, et sur les sujets âgés d'au moins 3 ans, il apparaît des inflorescences terminales, parfumées, paniculées et hermaphrodites à 5 pétales. Les inflorescences du manguier sont composées de grappes érigées portant des milliers de petites fleurs (8 000 à 10 000), à dominante rouge ou jaune. Généralement, la floraison de *Mangifera indica* est induite par la saison sèche. Il existe néanmoins quelques variétés qui fructifient différemment, quelquefois plusieurs fois par an. C'est de ces inflorescences que naîtra la mangue qui est un fruit tropical sous forme de drupe. Le fruit est de taille et de forme variable, plus ou moins aplati latéralement, et de poids très différent suivant la variété (de 100 à 2 400 grammes par fruit). Il est dissymétrique et l'apex se termine en générale par un bec.

La mangue comprend trois parties principales :
– la peau (exocarpe) ;
– la pulpe (mésocarpe) ;
– le noyau (endocarpe).

La peau est la partie externe qui recouvre le fruit. Elle est assez mince, généralement inférieure à 1 mm. À maturité elle peut avoir différentes couleurs selon les variétés, allant du vert au rouge en passant par le jaune.

La pulpe est la partie comestible du fruit. Elle est de couleur jaune orangé et peut être fondante ou un peu ferme. Les variétés améliorées comportent peu de fibres dans la pulpe et sont facilement acceptées par le consommateur de fruit frais. C'est cette pulpe qui est utilisée par les unités de séchage.

Le noyau sur lequel s'insèrent les fibres comporte une cavité dans laquelle se loge l'amande. Le tableau 1 indique les proportions des différentes parties de quelques cultivars de mangue.

Les deux dernières étapes de la formation du fruit sont les plus importantes pour le séchage :
– le stade climatique ;
– le stade final.

Le stade climatique s'allonge du 77e au 88e jour, après la formation des fruits. Durant ce stade, la respiration des cellules de la mangue augmente au maximum et les réserves s'accumulent sous forme d'amidon. À la fin de ce stade, la peau de la mangue commence à changer de couleur (passage du vert au jaune ambré ou autre, suivant la variété) et les apports nutritifs de l'arbre aux fruits se ralentissent notablement. C'est à la fin de ce stade que le fruit est mature et que la récolte peut se faire sans inconvénient pour la qualité des mangues et pour la qualité de la mangue séchée. Un fruit récolté avant ce stade ne mûrit pas et donne au séchage un produit blanchâtre ne répondant pas aux exigences du marché.

Durant le stade final, le fruit mûrit naturellement en subissant différentes transformations, dont les principales sont :
– la transformation de l'amidon en sucre ;
– la diminution de l'acidité ;
– l'apparition de la couleur du mûrissement.

La mangue destinée au séchage ne doit pas atteindre ce stade final, sinon le produit brunit au cours du séchage ou durant le stockage. En outre, à ce stade, les pertes au stockage sont importantes.

Au Burkina Faso, parmi l'ensemble des variétés de mangues connues, seules les variétés Amélie et Brooks sont séchées.

La variété Amélie est également appelée Governor. C'est la plus produite et elle représente 50 % des superficies cultivées. Le fruit est de taille moyenne, arrondi, avec une peau vert orangé. Son poids moyen est de 400 à 900 g. Sa chair est d'une couleur orange foncé, souple et sans fibre. Elle est de très bonne qualité gustative. Cette mangue est utilisée en début de campagne de séchage, car les premières récoltes ont lieu à partir de la seconde quinzaine du mois d'avril. Elle est légèrement acide à maturité et son mûrissement a l'avantage d'être facilement maîtrisable.

La variété Brooks est communément appelée « mangue retard ». Cette variété plus tardive produit du mois de juin au mois de septembre. Elle est donc utilisée pour la fin de campagne de séchage. Elle présente plusieurs types identifiables par la couleur de la peau et de la chair des fruits. Elle demeure une des plus hétérogènes en termes d'acidité. Le fruit pèse de 300 à 800 g. Le mûrissement naturel est très long après la cueillette (5 à 8 jours).

Une troisième variété appelée Kent, bien qu'encore inexploitée par les unités de séchage, présente un important potentiel du fait d'un ratio entre matière sèche et pulpe très favorable. Elle présente de gros fruits ovoïdes sans bec. La peau épaisse, de bonne résistance, est colorée de jaune verdâtre et de rouge foncé. Le noyau est de taille moyenne. La peau se détache aisément de la chair qui est jaune intense à jaune orangé (couleur qu'elle conserve au séchage), fondante, juteuse et sans fibre. Le poids moyen du fruit est de 700 à 800 g. Cette variété introduite récemment au Burkina Faso est encore faiblement disponible. Elle est essentiellement destinée à l'exportation en frais, mais pourrait à très brève échéance être utilisée pour le séchage, compte tenu de son importante diffusion.

Tableau 1. Comparaison des trois principales variétés de mangue du Burkina Faso.

Variété	Poids moyen d'un fruit (kg)	Peau (%)	Noyau (%)	Pulpe (%)
Amélie	0,400	8,1	5,1	86,8
Kent	0,757	13,4	6,2	80,4
Brooks	0,550	14,2	5,6	80,2

L'organisation de la filière

Plantations familiales concentrées dans quelques régions

La production de mangues est assurée par une multitude de petits planteurs. Elle est saisonnière, et tellement abondante en certaines périodes que des milliers de tonnes pourrissent aux pieds des arbres. Ces pertes importantes pourraient atteindre 50 % de la production.

Au Burkina Faso, l'introduction de variétés tardives et précoces a permis d'étaler la production du mois de février au mois de septembre avec une concentration en avril, mai et juin.

L'installation de ces vergers avait été accompagnée par l'État burkinabè jusqu'en 1991. Aujourd'hui, des efforts sont consentis par les exploitants dans la création de nouveaux vergers ou le remplacement des plus anciens. Ces efforts portent également sur la réorganisation de la filière, avec le concours d'Organisations non gouvernementales (ONG) et d'associations du Nord, en vue de promouvoir la production de mangues fraîches de qualité destinées à l'exportation, et la transformation locale à travers les groupements d'intérêt économique (GIE) qui ont progressivement vu le jour.

Développement des petites entreprises de séchage de mangues

Si pendant longtemps la mangue du Burkina Faso a été exportée en l'état, le début des années 1980 a été marqué par l'installation des premières unités de séchage avec le soutien des pouvoirs publics et d'ONG du Nord comme le Centre écologique Albert Schweitzer (Céas). Ces entreprises assurent la transformation d'une partie du surplus de la production, contribuent à la réduction des pertes et concourent à l'entrée de devises par l'exportation. L'accent peut être

mis sur la mangue séchée biologique et, dans ce cas, les vergers sont certifiés par un organisme agréé. Les exportations de mangues séchées se sont principalement orientées vers l'Europe, après avoir débuté en Suisse.

Selon le type d'équipement de séchage, les unités de transformation peuvent être classées en trois catégories :
– les unités équipées de séchoirs solaires, de type coquillage, de petite capacité. Elles traitent quelques dizaines de kilos de mangues fraîches par jour. Les séchoirs solaires de type coquillage ont été vulgarisés par l'ONG Abac, avec le soutien du Géres France. Actuellement, ce type d'unité est quasiment absent de la filière d'exportation des mangues séchées ;
– les unités équipées de séchoirs à combustion de gaz, à convection naturelle de type Céas Atesta. Elles sont les plus répandues et peuvent transformer environ une tonne de mangues fraîches par jour. En général, les unités possèdent plusieurs séchoirs qu'elles font construire par des artisans locaux au fur et à mesure du développement de leur activité. Ce sont ces unités qui fournissent le gros des volumes de mangues séchées pour l'exportation ;
– les unités équipées d'autres types de séchoirs, tels que le séchoir Cartier ou le séchoir Onudi mixte gasoil/solaire. On ne compte que quelques unités de ce type, principalement mises en place avec l'appui de projets.

En raison de la coïncidence de la seconde partie de la campagne de séchage avec la saison des pluies et pour des raisons économiques, le séchage à combustion directe de gaz est le plus utilisé. Il permet de sécher des volumes plus importants et d'obtenir une qualité nettement supérieure, plus homogène, conforme aux exigences du marché européen.

Pour être exportée, la mangue séchée doit en effet répondre à un certain nombre de critères de couleur et de taille (voir tableau 2, chapitre suivant).

La quasi-totalité des unités de séchage font partie d'associations de commercialisation. Ces dernières organisent et assurent les analyses des produits, l'encadrement des sécheurs et l'exportation des mangues séchées.

La mangue séchée est écoulée sur différents marchés suivant sa qualité. Plus de 80 % des mangues séchées de 1er choix sont exportées. Pour ce faire, les transformateurs doivent respecter un cahier des charges, transmis par les importateurs européens.

Les marchés de la mangue séchée

Marché conventionnel européen des fruits tropicaux séchés

L'exportation de produits agricoles bruts ou transformés est difficile, car l'on doit à la fois être en conformité avec les exigences d'un marché distant dont on ne maîtrise pas toujours les usages, et aussi affronter la concurrence vive de produits de diverses provenances.

On distingue deux grandes catégories de produits :
– les produits de bouche ;
– les produits composés.

Les produits de bouche – cocktails de fruits séchés pour apéritifs, sachets et barquettes de fruits séchés type pruneaux, abricots… – sont en général appréciés pour leur moelleux, leur taux d'humidité résiduelle étant de l'ordre de 35 %.

La conservation des fruits étant assurée soit par une pasteurisation, soit par l'ajout d'un conservateur, on parle de fruits « mi-cuits ».

Dans les produits composés ou complexes, les fruits séchés sont des intrants pour la fabrication de mélanges pour petit déjeuner (muesli, mélange de céréales et de fruits), barres céréalières, confiseries, glaces, pâtisseries…

La distribution des produits de bouche est assurée par des points de vente de proximité (boutiques de luxe, petits commerces…) et par la grande distribution (grandes et moyennes surfaces ou GMS). Les fruits séchés exotiques vendus comme produits apéritifs se rencontrent essentiellement en GMS. Il s'agit notamment de cubes d'ananas en provenance d'Asie (ananas confits). Les importateurs sont très exigeants sur la qualité du produit et sur l'emballage (packaging). C'est un créneau sur lequel la concurrence est extrêmement vive et où sont déjà présents les fournisseurs asiatiques (Thaïlande) et d'Amérique du Sud (Brésil).

L'industrie alimentaire est à la recherche d'intrants pour les produits composés ; les fruits tropicaux séchés en provenance d'Afrique ne se positionnent pas à l'heure actuelle sur ce marché, occupé uniquement par quelques produits asiatiques à des prix très bas.

Marché européen des produits biologiques

La définition d'un produit biologique alimentaire est harmonisée depuis 1991 entre les membres de l'Union européenne. Le cahier des charges portant sur la production, la transformation et le transport d'un produit biologique est détaillé dans le règlement CEE n° 2092/91 du Conseil du 24 juin 1991 (JO n° L 198 du 22/07/1991).

Un produit biologique est un produit agricole ou une denrée alimentaire dont les méthodes de production visent à respecter l'environnement et les équilibres naturels. Le mode de production ne fait intervenir aucun produit chimique de synthèse (pesticides, herbicides, fongicides, soude, métabisulfite de sodium…) et exclut l'utilisation d'organismes génétiquement modifiés (OGM).

Un organisme de contrôle indépendant et agréé par l'Union européenne vérifie régulièrement que les conditions de fabrication correspondent au cahier des charges. Cet organisme, dit « organisme certificateur », veille à l'application de toutes les dispositions réglementaires prévues et accorde ou non la mention « produit biologique ». Cette certification peut être retirée à tout moment s'il est constaté un manquement à la réglementation. La certification doit être renouvelée chaque année et le coût du contrôle demeure à la charge de l'entreprise ou du producteur qui la demande.

Le marché européen des produits biologiques a longtemps été considéré comme un marché alternatif à la consommation de masse. Il s'agissait essentiellement d'un mode de consommation militant, assez confidentiel, impliquant un réseau spécifique de producteurs et de distributeurs. Avec les crises alimentaires successives survenues à la fin des années 1990, ce marché a connu un nouvel essor. Les consommateurs européens sont de plus en plus attentifs à la notion de sécurité alimentaire et nombreux sont ceux qui se sont tournés vers l'alimentation biologique, provoquant ainsi l'émergence très rapide d'une niche de marché exploitable par les grands groupes alimentaires et par le réseau de distribution classique. Ces derniers veulent rendre le « bio » accessible à un grand nombre de consommateurs.

En Europe, l'importance du marché des produits biologiques varie considérablement d'un pays à l'autre. De 1999 à 2004, de nombreuses sources citent un taux de croissance du marché européen compris entre 6 % (Autriche) et 246 % (Italie). Ce taux est de 13 % pour la France et de 10 % pour l'Allemagne. Cette forte croissance est en grande partie due à l'implication de plus en plus forte de la grande distribution. Dans certains pays européens comme le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse ou le Danemark, 70 à 80 % des produits biologiques sont d'ores et déjà vendus en supermarché. Selon les importateurs européens, cette tendance se maintiendra au cours des prochaines années.

La demande du marché biologique évolue vers de nouvelles formes de présentation du produit ou encore vers l'incorporation de morceaux de mangues séchées dans des préparations complexes (muesli, barres chocolatées, produits laitiers…). Au contraire du marché conventionnel des produits séchés, la concurrence asiatique est faible sur ce marché des produits biologiques et les perspectives de croissance de ce secteur attisent les convoitises.

Marché du commerce équitable

Le marché du commerce équitable *(fairtrade)* est en forte progression en Europe, même s'il reste encore un marché de niche qui s'adresse à des acheteurs « militants ». La distribution se fait par des boutiques de proximité et des magasins qui ouvrent progressivement des rayons de produits équitables. Des fruits séchés de pays du Sud sont proposés par ces boutiques en France, en Suisse, en Belgique, en Allemagne, en Italie… À titre d'exemple, l'ananas séché du Bénin, du Togo et du Cameroun, et la mangue séchée du Burkina Faso sont commercialisés dans quelques pays européens *via* les centrales d'achat du commerce équitable.

La vente par correspondance de produits équitables est également en progression. Enfin, les grandes et moyennes surfaces distribuent des produits équitables, en général labellisés par une association ayant développé un label international. À ce jour, il s'agit de produits comme le café, le chocolat, les fruits frais (ananas, bananes), les jus de fruits, le miel…

Cependant, on ne trouve pas ou encore peu de fruits tropicaux séchés du commerce équitable en grandes et moyennes surfaces, alors que quelques coopératives de producteurs de mangues au Burkina Faso et d'ananas au Bénin sont labellisées et disposent d'unités de séchage de fruits ou vendent leurs fruits à des unités de séchage agréées.

Transformation de la mangue

Les principales étapes de transformation

Le procédé de transformation de la mangue fraîche en mangue séchée consiste en une succession d'opérations (figure 1) que l'on peut scinder en trois phases principales :
– préparation de la mangue, phase de prétraitement en zone de travail « humide » ;
– séchage de la mangue en zone de travail « sèche » ;
– conditionnement de la mangue séchée en zone de travail « sèche ».

Les principales opérations sont les suivantes :
– sélection de mangues en bon état après la récolte et à maturité optimale pour la transformation ;
– lavage ;
– épluchage ;
– tranchage des mangues épluchées ;
– mise en claies des pièces de mangues ;
– séchage ;
– tri des pièces de mangues sèches en 3 qualités ;
– conditionnement séparé des différentes qualités ;
– stockage des sachets et cartons de mangues séchées avant expédition.

Un bilan matière est présenté en figure 2.

La configuration d'une unité à 4 séchoirs (8 cellules) en convection naturelle est proposée en figure 3.

Il est à noter que chaque cellule d'un séchoir en convection naturelle a une capacité de séchage de 50 kg de pulpe (mangue épluchée, en tranches et morceaux) par 24 heures. Si l'on considère qu'il faut 120 kg de mangues pour obtenir 50 kg de pulpe (figure 2), l'unité proposée a une capacité de transformation de près de 1 tonne de mangues par 24 heures (soit environ 80 kg de produit sec).

Prétraitement

Matière première « mangue »

Il n'est possible de faire des bons produits secs qu'à partir de mangues fraîches de bonne qualité. La qualité de la mangue, matière première, joue un rôle très important dans la qualité du produit fini qu'est la mangue séchée. Cette qualité dépend de différents facteurs qui peuvent être maîtrisés, à savoir la variété, le degré de maturité, le mode de cueillette et le système de transport.

La mangue étant un fruit qui mûrit par étape, il importe de la récolter « vert-mature ». Il est conseillé de la cueillir au moins 14 semaines après la floraison. La mangue étant développée mais encore verte, le contrôle de son évolution ultérieure vers le stade pleinement mûr est facilité. Cueillie trop verte, la mangue mûrit mal (acide et peu sucrée) et cueillie tardivement, sa dégradation devient trop rapide pour permettre le transport et la transformation. Pour la variété

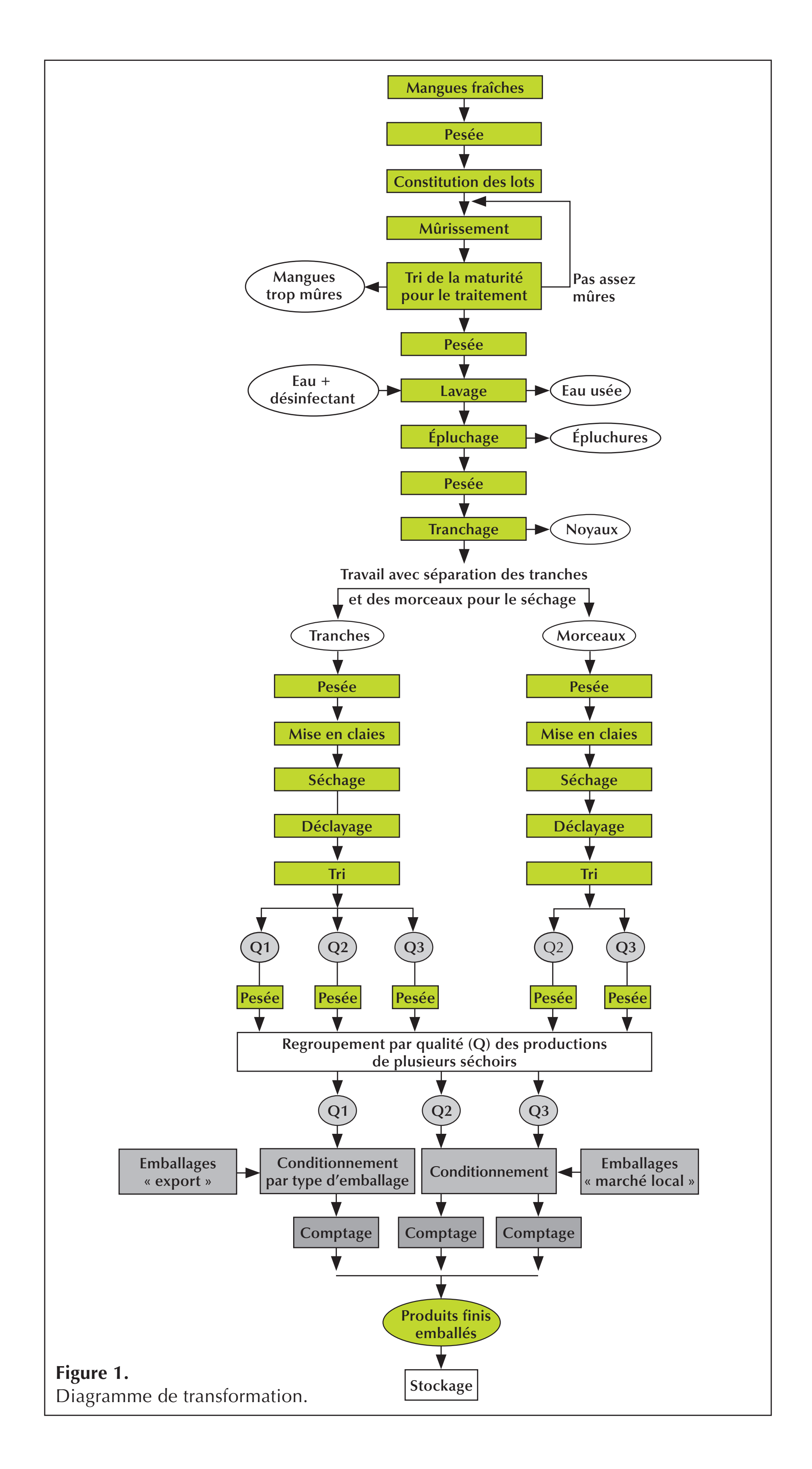


Figure 1.
Diagramme de transformation.

Brooks, le point de coupe est très délicat à apprécier et on évitera au maximum le mûrissement du fruit sur l'arbre.

> Comment choisir le bon fruit ?

- Ne pas cueillir de fruit trop vert, non arrivé à maturité ; couper quelques fruits pour s'assurer de la maturité.
- Le pédoncule du fruit est bien enfoncé.
- Le fruit est sans défaut (sans marques de meurtrissures).
- Le fruit est ferme au toucher.
- La peau du fruit est lisse et brillante.
- La coloration du pédoncule est jaunâtre à brun en fonction des variétés.
- De petites boules de sève brillantes se forment sur la peau (surtout sur les fruits de la variété Amélie).

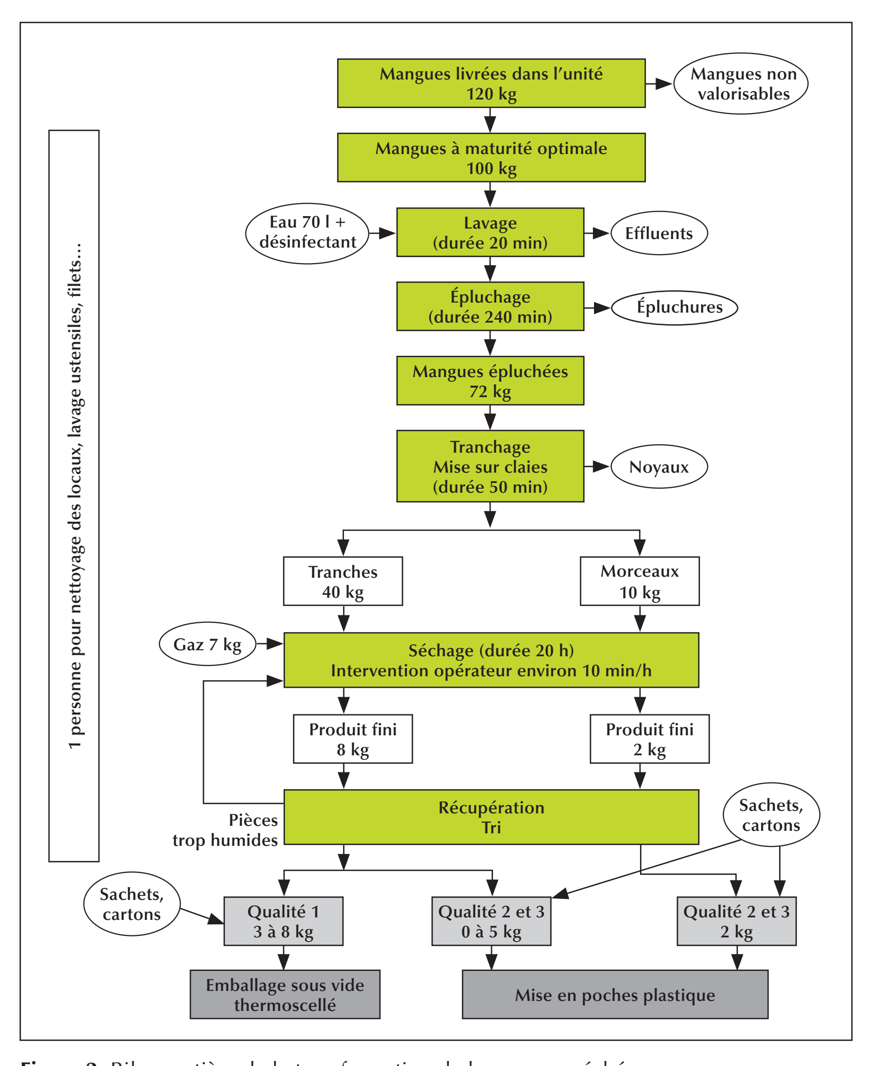


Figure 2. Bilan matière de la transformation de la mangue séchée.

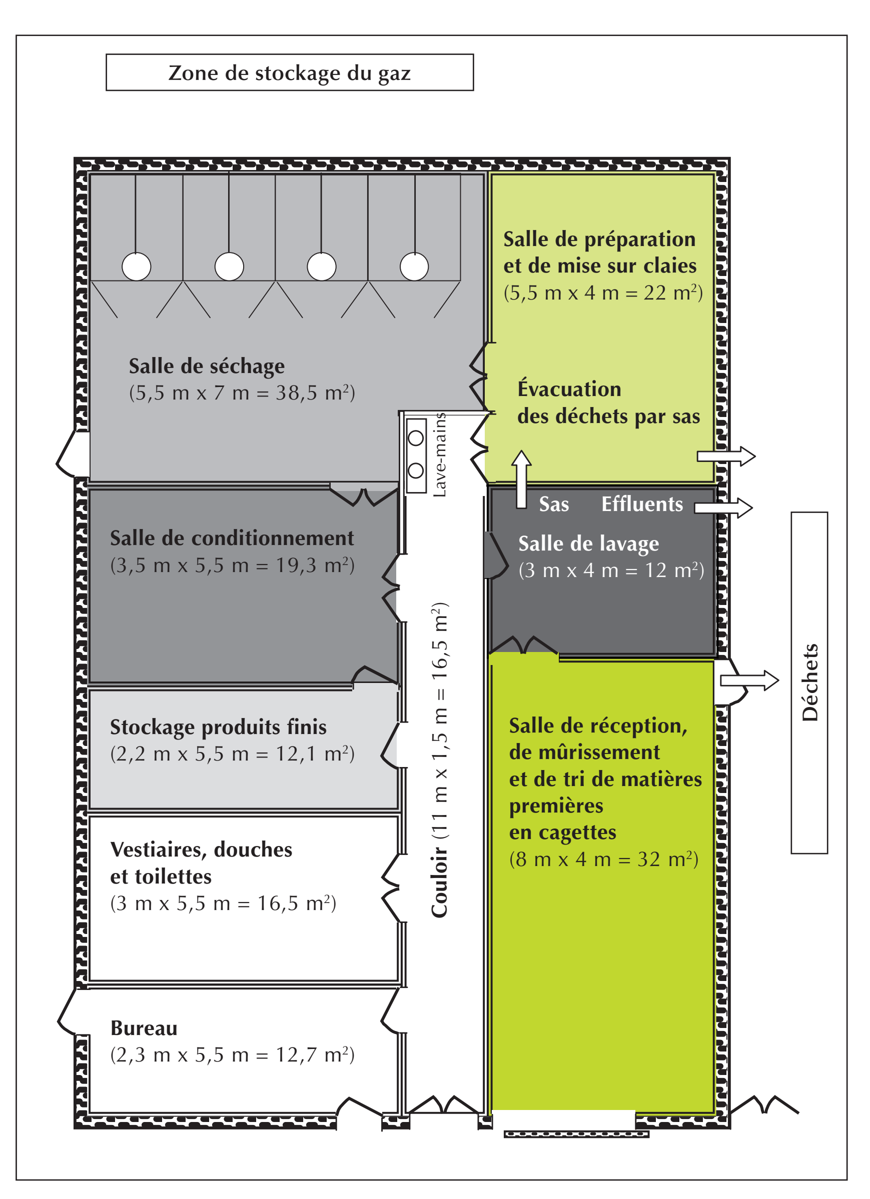


Figure 3. Proposition de plan d'une unité de séchage à 4 séchoirs en convection naturelle.

Au moment de la cueillette et au cours de toutes les manipulations liées au transport, on redoublera de soins pour éviter de provoquer des blessures aux fruits, qui seraient inévitablement colonisées par diverses moisissures et conduiraient à des parties brunes sur le produit sec. Très souvent, les mangues sont cueillies sans précautions particulières, par secouage des arbres et ramassage des fruits au sol. Or, les conditions de cueillette des fruits contribuent également à la qualité du produit fini. Les sécheurs de mangues doivent sensibiliser les producteurs, les cueilleurs et toutes les personnes qui manipulent les mangues jusqu'à l'unité de traitement afin de garantir au mieux la qualité de la matière première, indispensable à l'obtention d'une bonne qualité du produit fini.

> **Dégradations des fruits**

• Au moment de la cueillette et au cours de toutes les manipulations, il faut redoubler de précautions afin d'éviter les dégradations, qui peuvent être d'origine microbiologique ou biochimique.

• La mangue étant un fruit peu acide (pH = 4,5), toute blessure de la peau est rapidement colonisée par diverses levures et moisissures ; il peut y avoir modification du goût par fermentation. Par ailleurs, une présence de levures ou moisissures trop importantes sur les fruits secs peut le rendre hors normes.

• Tout choc subi par le fruit abîme ses cellules. Les composés présents à l'intérieur des cellules (enzymes, substrats) sont libérés comme dans un fruit trop mûr. Il y a alors altération de la couleur et de la texture. La respiration s'accélère, ce qui provoque une perte de poids et surtout une augmentation de la température susceptible d'affecter les fruits proches.

Transport

Le transport des mangues en vrac est le système le plus utilisé. Cette méthode, si elle a l'avantage de permettre d'acheminer de grosses quantités sur les sites, présente cependant des inconvénients dont l'ampleur dépend du degré de mûrissement et de la variété des fruits. L'utilisation de cagettes limite l'écrasement et les blessures de l'épiderme des fruits. À défaut, l'utilisation de paille ou de sciure de bois permet d'amortir les chocs durant le transport.

Réception et stockage des mangues

Le stockage et le mûrissement sont deux étapes importantes dans le processus de traitement de la mangue. La conduite du stockage est totalement différente selon que l'on considère une petite ou une grande quantité de fruits. Des composés volatils et des gaz de respiration sont produits ; s'ils ne sont pas éliminés régulièrement, ils affectent la qualité finale du fruit. Il faut éviter l'accumulation des composés volatils dans des pièces de stockage mal aérées.

Le lieu de stockage doit être exempt de toute source de contamination. Il est souhaitable que les mangues soient entreposées dans des cagettes après un tri rigoureux. Les mangues devront être disposées par lots provenant d'un même site à un même stade de mûrissement. Les mangues mûres devront être séparées systématiquement des autres ; celles en début de pourrissement doivent être éliminées. Un lavage des mangues avant l'entreposage doit être évité, un essuyage de surface suffit.

> **Contamination**

• Le stockage en vrac provoque la dégradation (pourriture) des fruits situés au bas des tas, ce qui peut entraîner une contamination en chaîne du stock.

La salle de réception, de mûrissement et de tri présentée sur le plan (figure 3) est conçue de manière à permettre un accès direct par la chaussée qui dessert l'unité. Une ouverture, équipée d'un portail coulissant, est suffisamment large pour permettre à un camion de se positionner aisément pour le déchargement. Deux portes sont également prévues dans cette salle :
– la première pour l'évacuation des mangues qui ne peuvent pas être traitées (trop mûres, marquées…) ;

– la deuxième pour le passage des mangues à maturité optimale, qui donne accès à la suite du traitement.

L'expérience a montré que, pour un fonctionnement avec un approvisionnement tous les 4 jours, il faut compter 8 m² par séchoir, qui permettent l'entreposage des caisses de mangues, mais aussi l'entreposage des caisses vides, le tri et le nettoyage. Dans la configuration à 4 séchoirs, la surface conseillée pour la salle de réception est de 32 m².

> Conditions d'hygiène

• Même si l'on est dans une phase de prétraitement et que les mangues sont encore couvertes de leur peau, il est important de travailler dans des conditions correctes d'hygiène : l'ensemble du personnel doit être quotidiennement sensibilisé au respect des règles d'hygiène et doit veiller à sa propreté ; la désinfection complète de la salle, des contenants et des divers matériels de travail doit être effectuée avant le début de chaque campagne et toutes les fois que la salle est peu remplie ; l'environnement immédiat de l'unité doit offrir un cadre sain avec un accès sur la chaussée et un accès vers la zone où sont entreposés les déchets.

Déstockage des mangues

Le tri de l'ensemble des mangues en stock se fait manuellement, tous les jours. L'opérateur apprécie visuellement et au toucher l'état de maturité des fruits. Il les classe en fonction du temps de maturation complémentaire jugé nécessaire pour obtenir la bonne maturité.

L'opérateur qui effectue le tri doit connaître l'influence du stade de maturité sur la facilité de parage et sur la qualité des produits finis. Pour cela, une période de travail à l'épluchage/découpe et au tri final est un préalable utile. Par ailleurs, l'opérateur apprend par expérience à ralentir ou à accélérer la maturation en jouant sur le remplissage des caisses, leur disposition, le renouvellement d'air de la pièce… Au bilan, l'entreposage et le tri influent fortement sur la production. Une attention particulière doit leur être portée.

Lors de cette opération, les mangues trop mûres et/ou pourries sont écartées et transférées à l'extérieur sur une zone où sont entreposés les déchets, dans des bacs ou des fûts équipés de couvercles pour ne pas attirer les insectes.

> Homogénéité des lots

• Au moment du tri et de la préparation pour la transformation, la recherche d'homogénéité des lots s'impose. Un tri permet de sélectionner les mangues de même calibre, de même degré de maturité et d'écarter les fruits suspects. Ainsi, les tâches sur les fruits sont souvent dues à l'action des micro-organismes ou à des piqures d'insectes, et il vaut mieux éliminer les fruits infectés.

• Il faut aussi écarter les mangues trop mûres afin de ne pas compromettre l'homogénéité du produit après séchage.

> Nettoyer dès que possible

• La campagne de transformation des mangues est longue et il est rare que toutes les parties du local de stockage (réception, mûrissement, tri des mangues en cagettes) soient vides en même temps. Pour parvenir à maintenir des conditions de propreté correctes, il est impératif de laver et nettoyer immédiatement les caisses et les surfaces de sol rendues accessibles par les manipulations liées au tri, faute de quoi les écoulements de jus entraînent des risques sanitaires, des mauvaises odeurs et la présence d'insectes.

On a pu constater lors de « l'audit » d'unités que, pour valoriser en séchage 100 kg de mangues fraîches, de 120 à 150 kg de fruits doivent être livrés. Ce qui signifie une perte de 15 à plus de 30 %, perte essentiellement due aux mauvaises conditions de récolte, de transport et de manipulation des fruits, en amont et dans l'unité.

Lavage des mangues

La surface des fruits porte naturellement des impuretés, des insectes et des micro-organismes. Lors de la découpe du fruit, la lame du couteau peut se charger en salissures au contact avec la surface, puis contaminer la chair. Les mains des opérateurs transportent également ces salissures.

Le lavage permet d'éliminer les impuretés et fragments de terre restés accrochés aux fruits. La qualité et la quantité de l'eau utilisée lors de cette opération sont très importantes. Le lavage peut se faire dans un bassin ou dans un bac muni de paniers. Le renouvellement de l'eau doit être régulier. L'idéal est de réaliser le lavage en trois étapes :
– un premier lavage des mangues à l'eau simple pour enlever la saleté organique et minérale ;
– un rinçage des mangues dans de l'eau javellisée pour inactiver les micro-organismes. La dilution de solution commerciale concentrée de Javel (type berlingot) à 10 % de chlore actif doit être de 4 ml pour 10 l d'eau. Le temps de mise en contact de la mangue avec l'eau javellisée doit être de 15 minutes ;
– un rinçage des mangues à l'eau potable pour enlever les résidus d'eau de javel.

La salle de lavage est accessible aux opérateurs dédiés à cette tâche, par le couloir de desserte des différentes zones de l'unité (figure 3).

Depuis la salle de stockage, une porte permet l'approvisionnement en mangues.

Après lavage, il est recommandé de transférer les mangues lavées vers la salle de préparation par des tubes traversant le mur de séparation.

Les eaux de lavage sont rejetées par des tuyauteries à l'extérieur du bâtiment dans un puits perdu.

La superficie conseillée pour cette salle est de 12 m² pour une installation à 8 cellules.

> **> Propreté**
>
> • De même que pour le stockage des mangues, même si l'on est dans une phase de prétraitement et que les mangues ne sont pas encore pelées, il est important de travailler dans des conditions hygiéniques strictes. Il faut s'assurer de la propreté du personnel, du produit et des locaux.
>
> • En fin de la phase de lavage, un nettoyage des bacs, du sol, des murs, des conduites de passage vers la salle de préparation s'impose avec de l'eau javellisée…
>
> • Vérifier le bon écoulement des effluents.

Préparation des mangues

Épluchage

L'épluchage permet d'enlever la peau du fruit et se fait le plus souvent manuellement au moyen d'un couteau. Les pertes de chair sont réduites si on utilise

des épluche-légumes, mais cela n'est possible que sur des fruits au bon stade de maturité.

Parage

Le parage est l'enlèvement des parties non comestibles ou de tout ce qui pourrait nuire à la présentation d'un produit alimentaire. Il se fait à la main sur des tables de parage. À l'aide de couteaux bien affûtés en acier inoxydable, les parties endommagées ou insuffisamment mûres sont éliminées.

Découpe

La découpe se fait en utilisant des couteaux en acier inoxydable, des plaques à lames multiples ou des mandolines. Ces derniers outils permettent d'obtenir des tranches d'épaisseur homogène. L'expérience aidant, les opérateurs arrivent à optimiser la découpe des mangues afin de limiter les pertes. Ainsi, ils procèdent à la découpe de la chair de la mangue selon trois axes (et non deux) autour du noyau, réduisant ainsi la quantité de morceaux de pulpe non conformes au standard de la qualité 1.

> Épaisseur des tranches

• La découpe définit la forme finale des morceaux de mangues sèches. Cependant, elle est aussi essentielle pour la phase de séchage. En effet, elle détermine la surface d'échange entre l'air et le produit, mais aussi le temps nécessaire pour extraire l'eau du centre des morceaux. Ainsi, plus la surface sera grande et moins les morceaux seront épais, plus le séchage sera rapide. La qualité d'une découpe s'évalue par l'homogénéité d'épaisseur entre les différents morceaux d'une part et l'épaisseur régulière pour un même morceau d'autre part. Par exemple, les bords minces d'une tranche deviennent durs alors que ses parties épaisses gardent leur souplesse mais se déshydratent pendant un temps très long.

La salle de préparation des mangues (épluchage, parage, dénoyautage, découpe) présentée sur le plan (figure 3) est accessible aux opérateurs par le couloir de desserte des différentes zones de l'unité.

> Évacuation des déchets

• Les déchets sont évacués vers la zone extérieure par un sas à double trappe, pour éviter toute contamination (insectes, poussière…). En aucun cas le personnel dédié à la préparation des mangues ne doit effectuer des allers-retours entre l'intérieur et l'extérieur de la salle. Une personne située à l'extérieur doit être chargée d'évacuer les déchets.

Mise sur claies

La mise sur claies des pièces est importante car elle a des conséquences sur l'état sanitaire du produit, sur la quantité de mangues qui sera séchée en un cycle et sur l'homogénéité du séchage.

L'état sanitaire du produit peut être affecté par un manque d'hygiène de l'opérateur et par des saletés mises en contact avec les pièces de mangues. Les claies ne doivent pas être souillées. Elles doivent être nettoyées à chaque cycle avec une éponge et de l'eau javellisée (suppression de toutes les salissures visibles) et séchées à l'air. Une inspection de chaque claie sera conduite lorsqu'on la manipule pour la disposer en situation de chargement. Pour améliorer les

conditions d'hygiène, des « filets » (tissu moustiquaire à poser sur le maillage des claies) sur lesquels sont disposées les pièces peuvent être utilisés. Ils doivent être lavés et séchés après chaque utilisation. Pour cela, on doit disposer de 2 jeux de filets.

La quantité de mangues sèches produite en un cycle dépend de la charge introduite dans le séchoir. Il faut donc charger les claies au maximum, c'est-à-dire ne laisser que des espaces très réduits entre les pièces.

Cependant, il faut absolument éviter que des morceaux se chevauchent. En effet, si cela arrive, soit les zones en contact ne seront pas suffisamment sèches et elles risqueront de se détériorer lors de la conservation, soit la durée de séchage devra être augmentée. Si, malgré l'attention apportée, quelques parties de pièces ne sont pas sèches, il est toujours possible de réaliser un séchage complémentaire, mais cela nuit à l'organisation de la production et à la qualité.

En pratique, pour une découpe en tranches de 8 mm d'épaisseur, il est conseillé une charge de 6 kg de mangues par m² de claie. Afin de pouvoir calculer le rendement final de l'opération, le produit doit être pesé avant et après séchage. Les claies sont ensuite introduites dans le séchoir.

Les dimensions conseillées pour cette salle sont calculées de la façon suivante : 2 m² par opérateur, sachant que l'expérience montre qu'il faut une moyenne de 2,7 opérateurs par séchoir à convection naturelle installé. Ainsi, pour une unité de 4 séchoirs, il faut environ 11 opérateurs ; la surface nécessaire pour ces 11 opérateurs est de 11 × 2 m², soit 22 m².

Dans la salle, il est utile de disposer d'un lavabo avec bac à eau javellisée : la première source de contamination est la « main sale ». Une commande du robinet au genou ou par pédale est un plus.

Ensuite, le travail doit se faire en conditions propres :
– pas de personne malade ni ayant de plaie aux mains ;
– cheveux attachés ;
– port de masques ;
– vêtements propres.

Par ailleurs, la présence de chair de mangues sans protection attire beaucoup les mouches. Celles-ci risquent de se coller au produit et de pondre des œufs ; de plus, elles gênent fortement le travail des opérateurs. Cela implique :
– une protection des orifices de ventilation et des ouvertures par des moustiquaires ;
– une désinsectisation avant le début du travail ;
– des pièges à insectes (lampes avec grille haute tension).

La protection des orifices par des moustiquaires réduit la ventilation. Par ailleurs, beaucoup de personnes se trouvent dans un espace limité. Enfin, on se trouve à coté de la salle des séchoirs, une pièce chaude. Il faut alors :
– une bonne conception du bâtiment avec des entrées d'air basses et des évacuations d'air en point haut, protégées par des moustiquaires ;
– si possible, des ventilateurs pour rafraîchir les opérateurs.

Traitements optionnels possibles

Blanchiment

Le blanchiment est un chauffage des produits à haute température (80 à 100 °C) pendant quelques minutes par trempage en eau chaude ou par exposition à la vapeur d'eau. Les fruits ne sont généralement pas blanchis car ils contiennent

beaucoup de solides solubles dans l'eau (par comparaison avec les légumes). Cependant, certaines expérimentations tendent à démontrer l'intérêt du blanchiment du fruit avant déshydratation. Le blanchiment sert notamment à inhiber les enzymes responsables d'altérations du produit. Ce blanchiment facilite également l'opération de séchage : les morceaux de mangue blanchis sèchent plus rapidement que les non blanchis, que ce soit dans une enceinte de séchage ou en séchage à l'air libre. Les effets indésirables du blanchiment sont liés à la rupture cellulaire qui rend le produit fini difficile à manipuler après traitement. Le blanchiment n'empêche pas le brunissement non enzymatique.

Sulfitage humide ou sec

Le sulfitage des tranches de mangue avant dessiccation a pour but de préserver leur couleur naturelle (inhibition du brunissement) et leur flaveur (meilleure rétention des composés aromatiques), et d'empêcher des pertes nutritionnelles. Si le sulfitage présente de nombreux effets intéressants sur le produit, il développe aussi des effets indésirables. En effet, selon les variétés, il peut entraîner une perte de sucre, d'acides et de vitamine C. De plus, un sulfitage excessif donne un mauvais goût au produit. Enfin, en Europe, la loi définit une teneur maximale en sulfite qui ne doit pas être dépassée. Malgré cela, le sulfitage est souvent préféré au blanchiment et cela à cause des inconvénients de ce dernier.

Plusieurs procédés sont proposés et sont effectivement en usage pour les fruits : le sulfitage par fumigation d'oxyde de souffre (SO2) en chambre fermée ; la combustion directe du souffre sur un petit réchaud ; l'immersion dans une solution sulfurique suivi d'un essorage et d'un égouttage.

La fumigation est le procédé le plus économique mais il est difficile d'évaluer la quantité de SO2 apportée. Le traitement par le soufre diffère selon le type de séchage :
– pour le séchage solaire, le soufrage dure au moins 3 heures en utilisant 250 à 300 g de soufre et 300 g de métabisulfite de sodium par 100 kg de fruits ;
– pour le séchage non solaire, le soufrage dure au plus 2 à 3 heures en utilisant 300 g de soufre par 100 kg de fruit.

Il est indispensable de séparer les lieux de travail de la zone de soufrage pour éviter de nuire à la santé des ouvriers. Pour produire des mangues séchées conformes au label biologique, le sulfitage est interdit.

Apport de sucre

L'addition de sucre améliore la couleur, la texture et le goût du produit. De plus, elle augmente le taux d'extrait sec soluble de la pulpe de mangue, en diminuant la quantité d'eau disponible dans le produit et permet ainsi d'atteindre plus rapidement l'humidité de conservation du produit.

Cependant, l'addition de sucre est difficile à réaliser et demande un savoir-faire et un équipement spécifique. Par ailleurs, elle conduit à des produits différents, proches de ceux proposés par les pays asiatiques.

Apport d'acide

L'adjonction d'acide citrique ralentit le brunissement, mais cet apport doit être modéré pour ne pas dégrader la vitamine C et le fructose contenus dans le fruit : bien que sources de brunissement, ces substances ont une importante

valeur nutritionnelle. Le jus de citron peut également être utilisé comme source d'acide citrique.

Apport de gélifiant

L'addition de pectine améliore la texture de la mangue séchée. Cependant, au-delà d'une certaine quantité de pectine ajoutée, le parfum du produit final est altéré. L'addition de 0,5 à 0,75 % de pectine est l'optimum recommandé.

Séchage

Le séchage est l'un des plus anciens procédés de préservation des aliments, avec pour objectif principal de convertir des denrées périssables en produits stabilisés. Le séchage consiste à enlever l'excès d'humidité d'un produit par évaporation de l'eau qu'il contient. Ce phénomène provoque un abaissement de l'activité de l'eau (aw) du produit, c'est-à-dire que l'eau restante est peu disponible pour les micro-organismes et pour les réactions chimiques. Dans les aliments déshydratés, du fait d'une faible activité de l'eau, les micro-organismes ne peuvent pas proliférer, et la plupart des réactions chimiques et enzymatiques de détérioration sont ralenties. On considère généralement qu'un produit est stable lorsque son activité de l'eau est inférieure ou égale à 0,65.

Les raisons de sécher sont aussi nombreuses que les produits à sécher, mais elles peuvent être regroupées en trois catégories principales :
– permettre ou faciliter la conservation des produits ;
– diminuer la masse et le volume des aliments, pour réduire leur encombrement et faciliter leur transport ;
– donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit.

Souvent, le séchage modifie le produit dans sa texture, sa forme, son goût ou ses qualités nutritionnelles. Ces modifications peuvent être recherchées ou elles peuvent constituer un inconvénient. Il s'agit d'une technique de conservation coûteuse en énergie. Ainsi, les estimations révèlent que le secteur agroalimentaire consacre généralement près de 60 % de sa consommation d'énergie au séchage.

Il existe de très nombreux ouvrages et cours de séchage. Nous ne donnons ci-après que quelques éléments de compréhension.

Principes physiques du séchage

Deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire l'eau d'un produit par évaporation : l'ébullition ou l'entraînement. La technique la plus simple consiste à porter le produit à la température d'ébullition de l'eau qui ainsi se vaporise. Mais sécher à des températures basses en utilisant l'air comme gaz d'entraînement est souvent préférable pour éliminer une grande quantité d'eau tout en préservant la qualité du produit. C'est ainsi que l'on procède dans le cas du séchage solaire indirect ou à gaz de la mangue.

Le mécanisme de séchage par entraînement consiste à placer un produit humide dans un courant d'air suffisamment chaud et sec (figure 4).
Un apport d'énergie (soleil, gaz…) est nécessaire pour chauffer l'air. L'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle de vapeur d'eau.

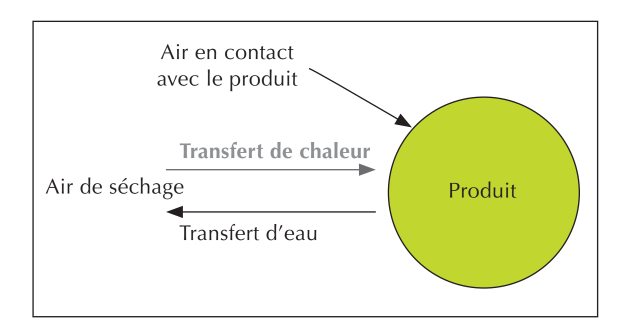


Figure 4. Représentation schématique des échanges de matière et de chaleur lors d'un séchage par entraînement.

L'apport de chaleur peut se faire par :
– conduction à partir d'une surface chaude ou du support sur lequel est posé le produit ;
– exposition à un rayonnement lumineux (soleil, infrarouge) ou électromagnétique (micro-ondes, hautes fréquences) ou par chauffage ohmique ;
– convection à partir d'un liquide, ce qui provoque un séchage par ébullition, ou à partir d'un gaz vecteur de la chaleur, ce qui correspond à un séchage par entraînement.
Ces modes de transferts de chaleur peuvent se combiner les uns aux autres.

Au cours d'un séchage par entraînement en convection naturelle et par chauffage au gaz, pratiqué dans de nombreuses unités de séchage de mangue, le transfert de chaleur se fait de la façon suivante :
– la chaleur est transférée par convection et par conduction de l'air vers la surface du produit à sécher (transfert externe). L'air directement en contact avec la surface est considéré comme immobile. Si la vitesse de l'air au voisinage est faible, il y a un écoulement sans mélange (écoulement laminaire) et le transfert de chaleur dans l'air se fait par conduction. Si la vitesse de l'air est élevée, des tourbillons apparaissent. L'écoulement est turbulent et le transfert de chaleur dans l'air se fait par convection. Dans les séchoirs à convection naturelle, l'écoulement est proche d'un écoulement laminaire ; cependant les obstacles (chicanes, restrictions…) permettent un peu de mélange. L'échange est relativement peu efficace. La présence d'un ventilateur peut augmenter la vitesse de l'air et la turbulence. L'échange est alors plus efficace ;
– le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur du produit (transfert interne) se fait par conduction. La chaleur diffuse dans le produit sous l'effet de différences de température.

Le transfert d'eau se réalise sous deux formes :
– le transfert interne correspond à la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface. Vers la fin du séchage, l'eau présente au centre du produit doit traverser la zone sèche périphérique d'épaisseur significative. Cela demande du temps ;
– le transfert externe correspond à l'élimination de la vapeur d'eau à la surface du produit par convection/diffusion. Comme pour la chaleur, l'échange dépend fortement de la vitesse de l'air au voisinage du produit.

En début de séchage, il y a de l'eau à la surface des pièces de mangues ou près de cette surface. C'est alors l'apport de chaleur par l'air qui limite la vitesse de séchage. À la fin du séchage, c'est le déplacement de l'eau du centre du produit vers la surface qui constitue le phénomène limitant.

Paramètres conditionnant le séchage

Disponibilité de l'eau dans la mangue

L'eau présente dans la mangue est plus ou moins « disponible » (fiche technique 2). Cette disponibilité varie en fonction de sa teneur en eau (le rapport entre la masse d'eau dans le produit et la masse totale de ce produit) et de sa composition biochimique. Elle est quantifiée par une grandeur appelée activité de l'eau du produit (aw). Celle-ci est définie comme l'humidité relative d'un air à l'équilibre thermique et hydrique avec le produit. C'est une mesure relative par rapport à un état de référence qui est celui de l'eau pure, pour laquelle l'activité de l'eau est égale à 1.

L'activité de l'eau d'un produit est toujours inférieure ou égale à 1. Lorsque l'eau contenue dans un produit a une activité proche de 1, elle s'évapore comme de l'eau pure à l'air libre. Par analogie, celle-ci est appelée « eau libre ». Lorsque l'activité de l'eau d'un produit est inférieure à 1, cela signifie que toute l'eau présente dans le produit contribue à la stabilité des constituants chimiques du produit par des liaisons plus ou moins fortes. Pour qu'un micro-organisme ou une réaction chimique puisse mobiliser cette eau, il faut qu'il fournisse une énergie suffisante pour rompre les liaisons existantes. Il en est de même pour enlever de l'eau par séchage. On parle alors « d'eau liée ».

En ce qui concerne la mangue fraîche, plus de la moitié de l'eau peut être considérée comme libre. La teneur en eau pour une bonne conservation (aw proche de 0,6) est de l'ordre de 14 g d'eau pour 100 g de mangue séchée. La relation entre la teneur en eau et l'aw pour une variété et une maturité de mangue est représentée figure 5. Cette courbe est donnée à titre d'exemple, toute différence de composition la modifiant. Notamment, des différences de concentration et de composition en sucres (glucose-fructose) modifient sensiblement les valeurs.

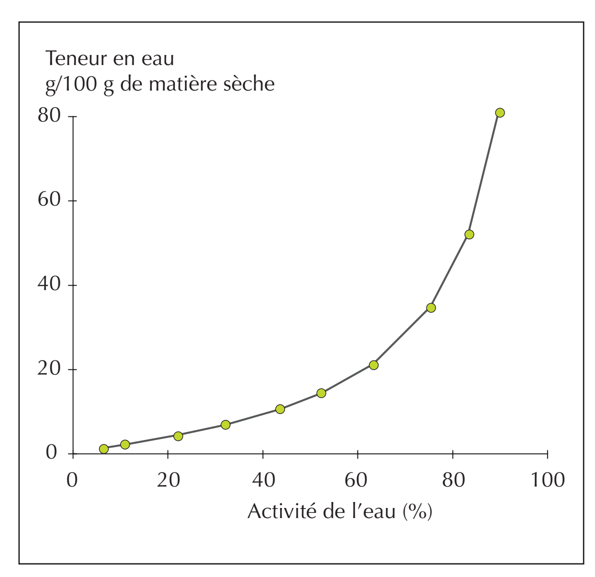


Figure 5. Exemple d'isotherme de désorption de mangues à 30 °C.

Source : données publiées dans *Enthalpy-Entropy compensation based on isotherms of mango*, Telis-Romero, J., Kohayakawa, M.N., Silveira, JR.V., Pedro, M.A.M., et Gabas, A.L., 2005, Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 25(2) : 297-303.

> Mesure de la teneur et de l'activité de l'eau

• Il est assez facile de mesurer la teneur en eau avec des équipements simples (balance, étuve ou four). La mesure de l'activité de l'eau demande un équipement spécifique, souvent présent seulement dans des laboratoires (aw-mètre ou capteur d'humidité relative). La tendance est alors de ne contrôler que la teneur en eau.

• Pourtant, c'est la connaissance de l'activité de l'eau qui permet de guider le séchage : il faut qu'elle soit assez basse pour garantir une bonne conservation et aussi élevée que possible pour que la texture soit bonne, le rendement de séchage (poids de produit sec obtenu pour une quantité de produit humide introduite) élevé et la consommation d'énergie limitée.

• Il est très utile de pouvoir disposer de mesures guides d'activité de l'eau et de teneur en eau réalisées sur des produits travaillés par l'unité (variété, maturité). Périodiquement, les conducteurs de séchoirs doivent « s'étalonner » pour parvenir à des produits secs aussi bons que possible.

Vitesse de l'air de séchage (fiches techniques 7 et 8)

L'apport d'une ventilation forcée dans une installation de séchage a pour conséquences l'accélération du début du séchage, l'amélioration de l'homogénéité de séchage et l'augmentation du rendement thermique.

Le début du séchage est accéléré. Cet effet a lieu tant qu'il y a de l'eau libre à la surface du produit, ce qui correspond au temps compris entre le début du séchage et le moment où les quartiers de mangues ont perdu environ 80 % de l'eau à éliminer au séchage. Cette phase est connue et décrite comme la phase de « séchage à vitesse constante ». Le produit est suffisamment riche en eau et le séchage en surface est suffisamment lent pour que la surface du produit reste bien humide. Durant cette phase, les transferts suivent les lois décrites ci-dessous :
– la température du produit est égale à la température humide de l'air (Th) (fiche technique 4) ;
– le flux de chaleur Q entre l'air et le produit s'écrit

$$Q = h \times S \times (Ts - Th),$$

avec S : surface du produit ; Ts : température sèche de l'air ; Th : température humide de l'air ; h : coefficient d'échange de chaleur air/produit. Selon la littérature, pour de l'air circulant parallèlement à une surface plate,

$$h = K \times V^{0,8},$$

avec K : constante ; V : vitesse de l'air. Ainsi, une multiplication de la vitesse de l'air par un facteur 2 conduit à un échange de chaleur entre l'air et le produit 1,7 fois plus important ;
– la quantité d'eau évaporée est directement proportionnelle à la chaleur que reçoit le produit, ou encore, toute la chaleur reçue par le produit se traduit par une évaporation d'eau.

L'homogénéité de séchage est améliorée : un ventilateur brasse l'air et permet un équilibrage dynamique des flux d'air. L'air qui est au contact des produits est alors presque le même dans tout le séchoir, que ce soit dans la largeur des claies ou dans leur longueur.

Le rendement thermique augmente : les valeurs de rendement thermique des séchoirs à mangues en convection naturelle sont connues avec un maximum de 35 % alors que, sur des séchoirs à recirculation d'air, on arrive à 60 % ou 70 %. L'augmentation de l'efficacité de l'échange entre l'air et le produit permet

d'obtenir un séchage aussi rapide, voire plus rapide, avec des différences de potentiels plus faibles (température ; pression de vapeur d'eau) entre l'air et le produit. La proportion de l'énergie apportée pour chauffer l'air rejeté sans avoir servi à évaporer de l'eau est alors plus faible. Cependant, l'augmentation du rendement thermique par utilisation d'air plus humide conduit à une élévation de la température humide de l'air et, en conséquence, de la température des produits pendant la première partie du séchage. Cela peut accélérer des réactions néfastes. Selon nos observations sur la mangue, la compétition entre l'augmentation de la vitesse de séchage et l'accélération de réactions conduit à une amélioration de la qualité des produits secs.

> Intérêt de la ventilation

- L'installation d'un ventilateur de convection forcée permet un séchage plus rapide limitant le brunissement des produits, une amélioration de l'homogénéité entre les morceaux sur une claie et entre les claies, et une augmentation du rendement thermique.

Périodes et allures de séchage

En séchage par entraînement à l'air chaud, les produits alimentaires subissent quatre périodes de séchage de durée variable suivant les caractéristiques de l'air et des produits.

La phase (0) correspond à la montée en température du produit jusqu'à atteindre la température d'évaporation de l'eau de surface. Cette dernière ne s'atteint pas tout de suite, puisque le produit a au départ du séchage une température plus basse et qu'il existe une inertie thermique. La vitesse de séchage augmente pendant cette phase. Cette phase ne dure que quelques minutes.

La phase (1) correspond à l'évaporation d'eau libre (aw = 1) à la surface du produit, sans cesse renouvelée par l'eau venant de l'intérieur du produit. La température du produit reste constante et égale, par définition, à la température humide de l'air de séchage. La vitesse de séchage de cette période est constante, et aussi limitée par le transfert de chaleur à travers la couche limite d'air. Cette vitesse peut être accélérée soit en abaissant l'humidité relative de l'air, soit en augmentant la température de l'air avant son arrivée sur le produit, soit en augmentant la vitesse de circulation de l'air au contact du produit. L'abaissement de l'humidité relative a l'effet le plus important, mais il s'accompagne d'un abaissement du rendement thermique et par conséquent d'un coût énergétique du séchage plus élevé. *A contrario*, l'augmentation de la température de l'air accélère le séchage et augmente en même temps le rendement thermique. Cependant, elle est limitée par la nature et les caractéristiques du produit séché et des matériaux constitutifs du séchoir. Enfin, une multiplication de la vitesse de l'air par un facteur 2 conduit à un échange de chaleur entre l'air et le produit 1,7 fois plus important. L'augmentation de la vitesse de séchage est aussi limitée par un phénomène spécifique du produit : le croûtage. Ce dernier est dû à la capacité limitée de diffusion de l'eau dans le produit. Si la capacité évaporatoire de l'air est très forte, l'eau s'évapore plus vite à la surface du produit qu'à l'intérieur. Par conséquent, la surface devient dure et sèche et empêche la diffusion ultérieure de l'eau contenue dans le produit. Ce croûtage est d'autant plus grand que l'humidité de l'air au contact du produit est faible, que la vitesse de circulation de l'air sur le produit est élevée et que le produit est épais.

La phase (2) correspond à un ralentissement de la vitesse de séchage dû au temps nécessaire pour que l'eau située à l'intérieur du produit migre vers la surface. La température de surface du produit s'élève progressivement pour atteindre la température sèche de l'air. Dans une certaine mesure, une modification de la vitesse de l'air ne change pas la vitesse de séchage. Une température de l'air élevée accélère le séchage mais favorise souvent le brunissement non enzymatique.

Une phase (3) est définie par certains auteurs. Elle correspond à l'évaporation d'eau liée. Elle se superpose partiellement avec la phase (2) et n'est identifiée que par une modification de la pente de la représentation de la vitesse de séchage, en fonction de la teneur en eau. Dans la suite du document, les phases (2) et (3) sont regroupées sous le même terme « phase (2) ».

Relations entre les caractéristiques de l'aliment et la vitesse de séchage

Le comportement en séchage d'un produit dépend de ses caractéristiques physico-chimiques et de sa géométrie. Bien qu'il ne soit pas possible de modifier la composition des mangues, on peut donner les indications suivantes :
– une teneur en eau élevée du fruit frais augmente la durée de la phase (1) du séchage mais l'impact sur la durée totale du séchage est faible. En revanche, la consommation énergétique pour une même quantité de produit sec est accrue et la quantité de produit sec obtenue dans un séchoir est inférieure. Il est donc au moins doublement rentable de travailler avec des mangues à forte teneur en matière sèche ;
– une teneur en sucre élevée ralentit le séchage. En contrepartie, le produit est stable à une teneur en eau légèrement plus élevée et sa texture est plus agréable.

La géométrie des pièces de mangues est déterminée par la découpe. Pour des tranches « identiques », le paramètre essentiel est la demi-épaisseur. Elle correspond à la distance que devra parcourir l'eau pour aller du centre des pièces jusqu'à la surface.

Le comportement en phase (1) est directement lié à l'épaisseur. Pour deux pièces de même surface de contact avec l'air mais d'épaisseur différente, le débit d'eau évaporée sera identique mais au final, la variation de teneur en eau sera plus faible sur le produit le plus épais. À la fin de la phase (1), on obtiendra une même épaisseur de zone sèche à la périphérie des deux pièces. La pièce la plus épaisse sera alors plus humide que la plus fine.

Selon les lois de la physique, pour une même perte en eau, la durée de la phase (2) est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la tranche. Ainsi, une épaisseur deux fois plus importante conduit à une durée de phase (2) quatre fois plus élevée.

Au bilan, l'épaisseur moyenne des tranches joue fortement sur la durée du séchage. Cependant, la portée de cette logique doit être limitée en fonction de l'organisation de la production – une durée de cycle de 16 ou de 22 heures impose un unique cycle par jour mais la quantité de produit obtenu n'est pas la même –, et de la qualité des produits exigés par les clients.

Dans la pratique, les tranches ne sont pas toutes les mêmes. Pour une bonne conservation des produits secs, il est nécessaire que le produit le plus humide soit stable. Ainsi, la régularité de découpe est aussi importante que l'épaisseur moyenne des pièces.

Impact du séchage sur la qualité des mangues séchées

La qualité des mangues sèches joue à différentes étapes : l'achat en magasin, sur table et dans les mains avant consommation, en bouche et dans le corps. À chacune de ces étapes correspondent des critères de qualité déterminants.

Couleur

La couleur s'apprécie d'abord de loin, sur le présentoir. Avant la couleur, c'est l'homogénéité de couleur qui montre une bonne maîtrise de la qualité et fait espérer au consommateur qu'il retrouvera un produit qu'il a déjà apprécié. Ce besoin d'homogénéité existe aussi pour les produits d'un même paquet.

L'homogénéité vient essentiellement d'une sélection rigoureuse de la matière première (même variété, même stade de maturité), de la bonne élimination des zones blessées et d'un séchage identique pour les différentes pièces. Ce dernier point est relativement facile à obtenir dans des séchoirs ventilés ; en revanche, en convection naturelle, l'habileté du conducteur de séchoir pour permuter les claies est essentielle.

La teinte et la luminance des produits viennent dans un second temps. Un orange moyen est le signe d'un produit sucré et non caramélisé. Une teinte jaune ou claire montre que le fruit n'était pas mature, alors qu'une teinte brun sombre peut avoir plusieurs origines.

Le brunissement enzymatique (fiche technique 3) est par définition la transformation de composés phénoliques existant dans le produit biologique en polymères colorés, le plus souvent noirs ou bruns, par le biais d'enzymes. Cette réaction n'est pas activée tant que les cellules sont saines et intactes. Son développement est rapide dans les fruits trop mûrs ainsi qu'au niveau des blessures (chocs, épluchage, parage…). Sa vitesse est maximale pour des températures de l'ordre de 40 °C et en présence d'eau libre. L'abaissement de l'activité de l'eau la ralentit. Un abaissement du pH, la présence de réducteurs ou un traitement thermique ont un effet dans le même sens. Les mangues sont très sensibles au brunissement enzymatique.

> **> Minimiser les défauts**
>
> • Une grande attention doit être accordée à l'obtention de tranches sans défaut, à la réduction du temps d'attente entre découpe et début de séchage et au franchissement rapide de la phase (1) du séchage. La principale amélioration de la qualité des mangues apportée par l'utilisation d'une ventilation en séchoir consiste à réduire la durée de la phase (1) et, en conséquence, à limiter le développement des réactions de brunissement enzymatique.

Le brunissement non enzymatique (fiche technique 3) désigne un ensemble très complexe de réactions nommées « réactions de Maillard », aboutissant dans divers aliments à la formation des pigments bruns, et souvent à des modifications de l'odeur et de la saveur. Le brunissement non enzymatique est favorisé par une activité de l'eau proche de 0,6 et par des températures élevées. C'est un phénomène souvent rencontré dans les opérations de séchage ou de cuisson au four (croûte du pain, biscuit…). Pour les mangues, on cherche à éviter ce brunissement. C'est pourquoi la température de l'air de séchage est progressivement abaissée en phase (2).

Arôme

L'une des qualités organoleptiques importantes de la mangue est son arôme agréable et puissant. Ce dernier est la résultante de nombreux composés

volatils présents en faible quantité. Pour conserver cette qualité, la sélection de la matière première est fondamentale. Ensuite, lors du séchage, il peut y avoir entraînement d'arômes par l'air, développement de réactions de dégradation et apparition de nouveaux composés, notamment issus des réactions de Maillard (goût de caramel).

Modifications physiques et structurales

Le séchage provoque une réduction du volume des pièces qui correspond à peu près au volume d'eau enlevé.

Parfois, on constate l'apparition de boursouflures à la surface des produits. Elles correspondent à la présence de bulles d'air à l'intérieur des pièces. Bien qu'aucun travail systématique n'ait été conduit à ce sujet, il semble que leur origine soit une température trop élevée au cours de la phase (1).

Par ailleurs, il semble que la façon de conduire la phase (1) puisse modifier l'adhésion des pièces de mangues aux tissus des claies qui les supportent. Un séchage lent favoriserait l'entraînement de sucre par l'eau, de l'intérieur vers la surface, ce qui renforcerait le collant. Ce phénomène est cependant négligeable comparativement au choix de la matière première. Une teneur en eau trop élevée ou une maturité trop importante rendent difficile le décollement des pièces sèches.

Enfin, la texture des produits secs dépend fortement de leur teneur en eau. Jusqu'à une certaine limite, plus le produit est sec, plus sa texture est proche de celle du cuir : ferme et difficile à déchirer. Le consommateur préfère des produits moelleux et pouvant être morcelés facilement. Il faut sécher suffisamment pour obtenir une bonne conservation, mais le moins possible.

Microbiologie

Il existe des normes légales ou commerciales qui définissent les charges microbiennes tolérables. Leur respect est impératif. La charge microbiologique de la chair des mangues est très faible dans les fruits frais. C'est lors de l'épluchage, du parage et de la découpe qu'il y a contamination. Naturellement, il faut veiller à ce que l'air qui entre dans les séchoirs ne soit pas pris dans une zone sale car il pourrait contribuer à la pollution des produits.

Bien que la température de l'air de séchage puisse atteindre plus de 80 °C dans certaines installations, il faut considérer que le séchage ne réduit pas la charge microbiologique. En effet, pendant la phase (1), la température du produit reste proche de la température humide de l'air. Dans les conditions généralement utilisées, cela correspond à 30-45 °C. Ensuite, en phase (2), la température du produit s'élève, mais il est connu que la sensibilité des micro-organismes à la chaleur est réduite pour les activités d'eau faibles. Ainsi, l'effet « pasteurisateur » est faible.

Critères d'appréciation de la qualité de la mangue séchée

Stabilité microbiologique du produit sec

Pour une bonne conservation, il est nécessaire que les différents morceaux de mangues et les différentes parties d'un même morceau aient une activité de l'eau suffisamment basse : une humidité du produit qui lui confère une stabilité dans le temps. Par ailleurs, les conditions que subit le produit au cours du séchage doivent limiter l'apport de micro-organismes exogènes et la croissance de ceux présents en surface. Pour cela, la période de séchage pendant laquelle la surface des produits est saturée en eau doit être particulièrement bien maîtrisée.

Qualité organoleptique des produits
Des modifications d'aspect et d'arômes peuvent avoir lieu ou être provoquées par le séchage : réactions enzymatiques en début de séchage, réaction de brunissement non enzymatique (type « réaction de Maillard ») en fin de séchage. Pour chaque produit, on est amené à définir un diagramme de séchage (durée des phases de séchage et températures associées). Les conditions de séchage sont adaptées en fonction de la qualité de la matière première et en fonction de l'avancement de la déshydratation.

Appréciation économique du séchage

Le séchage consomme une quantité importante d'énergie. Celle-ci représente une part significative du coût de revient du produit final (15 à 20 % du coût de revient de la mangue séchée). Il est possible de modifier sensiblement le rendement énergétique d'un séchoir. Pour l'améliorer, les voies classiques sont l'élévation de la température de l'air, l'augmentation de l'humidité relative de l'air extrait et la ventilation.

Les modifications de qualité provoquées par le séchage peuvent faire varier fortement le prix de vente de la mangue séchée : au Burkina Faso, par exemple, le prix de vente de la « qualité 2 » ne couvre que le coût de revient alors que celui de la « qualité export » permet un prix de vente deux fois supérieur au coût de revient.

Cela amène à se poser la question : faut-il sécher les morceaux de mangues issus de la découpe autour du noyau lorsque la qualité export ne correspond qu'aux tranches ?

Les études menées ont pu montrer que, au bilan, le séchage des morceaux pénalise la rentabilité d'environ 10 %.

Local de séchage

La salle de séchage présentée sur le plan (figure 3) est conçue de telle façon que l'accès puisse se faire directement par le couloir intérieur de desserte des différentes salles de l'unité. Une porte donnant sur l'extérieur est prévue comme issue de secours et permet également au conducteur de séchoir d'avoir accès à la zone de stockage des bouteilles de gaz. Les dimensions conseillées pour cette salle sont calculées sur la base de 9 m² par séchoir installé. Soit par exemple, pour une unité de 4 séchoirs à convection naturelle, 36 m².

Opérations post-séchage

Dimensionnement de la salle

La salle de conditionnement présentée sur le plan (figure 3) est conçue de telle façon que l'accès puisse se faire directement par le couloir intérieur de desserte des différentes salles de l'unité. Les dimensions conseillées pour cette salle sont calculées sur la base de 4 m² par séchoir installé. Soit par exemple, pour une unité de 4 séchoirs à convection naturelle, 16 m².

Déclayage

En fin de séchage, les tissus supportant les mangues sèches sont immédiatement retirés des claies afin de les libérer. Un second jeu de tissus permet la réutilisation

immédiate des claies pour un nouveau cycle de séchage. Les tissus chargés de mangues sèches sont immédiatement transférés dans la salle de conditionnement afin de protéger les produits des insectes.

Les tranches et morceaux de mangues sont décollés si possible dans l'heure qui suit la sortie du séchoir afin que le jus séché en surface n'ait pas durci. Lors de cette opération, seuls les morceaux trop humides sont triés afin de pouvoir être mis en séchage complémentaire. Le reste du produit est disposé en vrac dans des bidons étanches d'une contenance de 50 l environ.

Équilibrage des teneurs en eau

Le mélange des pièces de produit réalisé lors de leur mise en bidon met en contact des tranches et morceaux de différentes teneurs en eau. L'eau diffuse d'une pièce à l'autre. Généralement, on laisse les pièces pendant 2 jours dans les bidons en les brassant matin et soir.

On doit veiller à ce que les variations de température dans la salle de conditionnement ne soient pas trop importantes et rapides. Un refroidissement rapide et important de l'air autour d'un bidon « chaud » peut induire une condensation d'eau sur ses surfaces internes, créant un risque de développement de moisissures.

Conditionnement des mangues séchées

Les mangues séchées peuvent être stockées en vrac ou bien une fois emballées. La première solution permet d'adapter le type d'emballage en fonction de la demande mais elle réduit la protection des produits contre les variations d'humidité de l'ambiance et contre les risques de contamination par des insectes.

Un tri est réalisé au moment de l'emballage car les différences de matières premières, de prétraitements et de séchage conduisent à trois classes de

> Conservation du produit séché

• Un produit séché peut s'altérer si la conservation n'est pas bien conçue, d'où son importance. Les tranches de mangues séchées doivent être emballées si possible sous vide. L'emballage doit être imperméable à l'oxygène, à la vapeur d'eau et opaque à la lumière. Une température d'entreposage de 25 °C permet d'éviter les dégradations de la couleur et des composés nutritifs.

> Salle de conditionnement

• Par respect des règles générales d'hygiène et pour prévenir des risques en termes de sécurité alimentaire, le produit doit être conditionné dans une salle spécifique :
– carrelée jusqu'à une hauteur d'environ 1 m ;
– ventilée ;
– avec des fenêtres équipées de moustiquaires ;
– et une porte toujours fermée.

• D'autre part, les règles suivantes doivent être strictement suivies :
– le personnel doit disposer de blouse, de masque, de coiffe, de cache-nez ;
– les opérateurs avec des plaies doivent être écartés de la salle ;
– les chaussures d'extérieur ne sont pas autorisées dans la salle de conditionnement ;
– aucun visiteur n'est autorisé à entrer dans la salle sans l'accord du chef de production.

qualité (tableau 2). La qualité supérieure (dite « export » ou 1er choix) de mangue séchée est destinée à l'exportation. Les autres qualités sont vendues sur le marché local à des commerces d'alimentation, aux employés et aux riverains des unités.

Tableau 2. Caractéristiques des mangues séchées.

Paramètre	1er Choix	2e Choix	3e Choix
Description du produit	Couleur : orange à jaune Taille des tranches : Longueur : 6 à 8 cm Largeur : 3 à 5 cm Épaisseur : 2 à 4 mm	Taille trop petite pour être du 1er choix mais même qualité gustative	Fruits racornis, trop secs ou ayant subi un séchage trop poussé (brunissement)
Conditionnement	Sachet souvent importé de 100 g, 150 g, 200 g, 1 kg, 5 kg	À la demande, sachet fourni localement	À la demande, sachet fourni localement
Clientèle	Export	Marché local	Marché local

Stockage des mangues séchées

La salle de stockage des produits emballés présentée sur le plan (figure 3) est conçue de telle façon que l'accès puisse se faire directement par le couloir intérieur de desserte des différentes salles de l'unité. Les dimensions conseillées pour cette salle sont calculées sur la base de 200 kg de mangues séchées par m², en tenant compte d'un empilement convenable des cartons. Le dimensionnement de la salle doit prendre en compte les plannings de livraison courants.

Les équipements de séchage

Séchoir à gaz à convection naturelle

En Afrique de l'Ouest (particulièrement au Burkina Faso), la majorité des unités de séchage de mangues sont équipées de séchoirs à combustion de gaz créés par le Céas, Centre écologique Albert Schweitzer (figure 6). Ce sont des séchoirs dits à convection naturelle (fiche technique 8). Ils fonctionnent en « batch ».

Le séchoir à convection naturelle est composé :
– d'une semelle maçonnée de dimensions 1,8 m x 1,8 m x 0,7 m. C'est la partie du séchoir qui repose sur le sol. Elle est constituée de deux compartiments ayant chacun une ouverture avec trappe à l'avant servant à l'allumage des brûleurs, au contrôle de la flamme et au nettoyage ; une ouverture d'arrivée d'air à l'arrière permet une circulation d'air et la combustion du gaz. À l'intérieur de chaque compartiment de cette semelle se trouve un brûleur à gaz (donc deux brûleurs par semelle) de type rampe, fixé sur la trappe de l'ouverture avant du séchoir. Chaque brûleur est constitué de deux tuyaux métalliques et de deux robinets à gaz équipés de gicleur ;
– d'un box de deux cellules concomitantes dans lesquelles dix claies de séchage (de dimensions 0,7 m x 1,2 m, soit 0,84 m²) peuvent être positionnées sur des glissières (liteaux carrés de bois) ;

– d'une hotte qui relie le box à la cheminée. Elle canalise l'air chaud et humide vers la cheminée et elle supporte cette dernière. Pour cela, elle doit être solide, isolante, et permettre une bonne circulation de l'air chaud ;
– d'une cheminée, qui constitue la partie la plus haute du séchoir. Elle permet l'évacuation de l'air humide tout en évitant aux eaux de pluie et aux vents chargés de poussière de pénétrer dans le séchoir.

Le chargement du séchoir se fait claie par claie après ouverture de la porte d'accès à chacune des cellules de séchage. Chaque claie est chargée de 5 kg de tranches de mangues (valeur de poids conseillée). Toutes les 2 heures environ, le conducteur de séchoir fait une permutation de claies haut/bas et avant/arrière, afin d'obtenir une bonne homogénéité « cartographique » du séchage.

L'apport d'énergie provient de la combustion de gaz butane. Par convection naturelle (fiche technique 8), l'air chaud et sec se déplace du brûleur vers le haut du séchoir tout en se refroidissant et en se chargeant d'humidité lors du passage sur les mangues.

Le séchage se fait suivant deux phases : pendant 10 à 12 heures, la température au sein des cellules est d'environ 80 °C. La différence des températures indiquées par les deux thermomètres, situés l'un avant le produit et l'autre au deux tiers de la hauteur du séchoir, permet de détecter la fin de cette première phase. Ensuite, la puissance du brûleur est réduite afin d'avoir une température

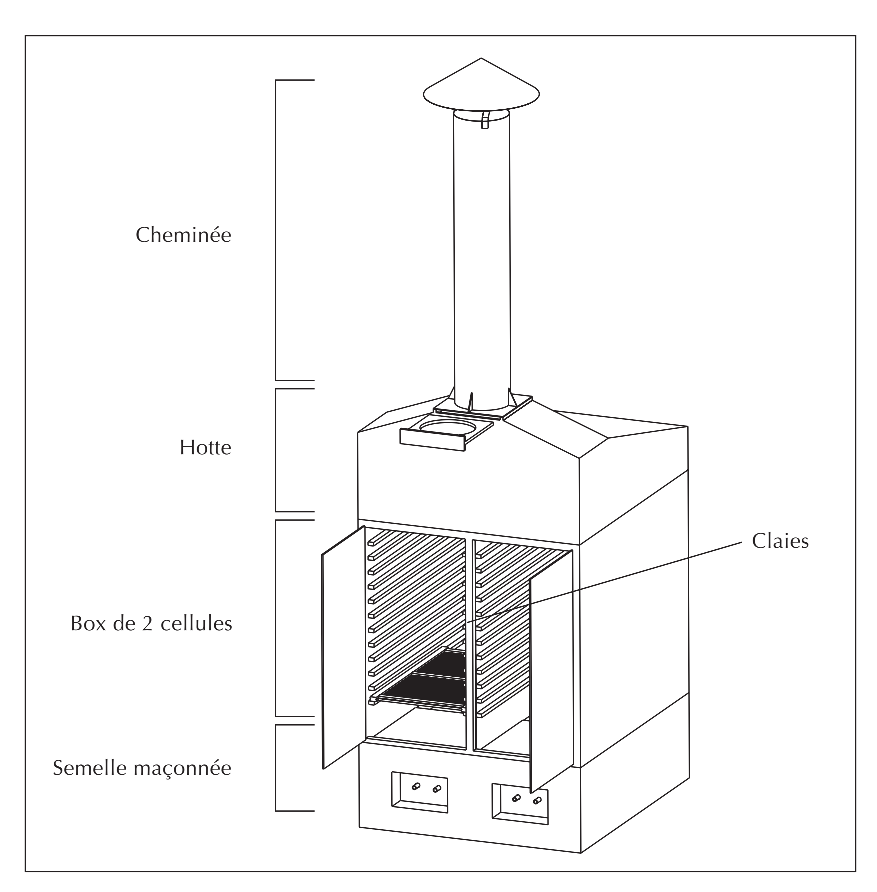


Figure 6. Schéma d'un séchoir à convection naturelle Céas Atesta.

d'environ 40 à 50 °C jusqu'à la fin du séchage qui, au total, dure entre 20 et 24 heures. Les claies sont permutées régulièrement (haut/bas) et retournées (avant/arrière) par un conducteur de séchoir dont l'expérience conditionne la qualité moyenne et l'homogénéité des produits finis.

Le séchoir est essentiellement réalisé en matériaux locaux, ce qui fait en grande partie son succès et son prix abordable, de l'ordre de 1 500 €. Peu de maintenance est à apporter au long de sa durée de vie (environ 10 ans) : changement des tasseaux supports de claies usés, nettoyage régulier des brûleurs, vérification de l'étanchéité des portes, entretien des claies.

Le rendement énergétique, de 30 % maximum, est faible (dans le domaine du séchage de produits alimentaires) mais reste correct pour un séchoir en convection naturelle. Ce dernier principe (peu de vitesse d'air) impose de faibles vitesses de séchage, donc un temps de séchage important.

> Avantages et inconvénients du séchoir à gaz à convection naturelle

- Avantages : facilité de réalisation ; utilisation de matériaux locaux et de gaz comme énergie ; prix et entretien réduit ; facilité de conduite ; réduction du temps de séchage par rapport au séchage au soleil et amélioration de la qualité ; polyvalence (séchage d'autres produits) ; séchage en enceinte « confinée » (peu de poussière et d'insectes).
- Inconvénients : durée de séchage longue ; hétérogénéité de séchage entre les claies ; hétérogénéité de séchage dans le temps ; contrôle difficile de la température.

Fonctions que doit remplir un équipement de séchage de mangues

Sécher des mangues

Chaque morceau de mangue doit atteindre une bonne teneur en eau finale : on peut considérer que celle-ci doit être proche de 13 % (en base humide). L'humidité des produits secs doit être suffisamment basse pour assurer une bonne conservation et la plus haute possible pour avoir le meilleur rendement matière. De plus, les produits « bien secs » ont une texture plus agréable que les produits « trop secs ». L'homogénéité de séchage entre mangues et entre lots de mangues séchées doit faire également l'objet d'attentions afin d'avoir une production microbiologiquement stable.

Obtenir un produit fini de qualité

Le point le plus important est d'avoir des mangues séchées de belle couleur (proche de celle de la pulpe et sans brunissement), avec préservation du goût et une homogénéité des tranches (formes et dimensions). Ces critères, s'ils sont respectés, permettent d'obtenir des mangues séchées de qualité export.

Être finançable par l'entreprise

Un séchoir doit rester dans une gamme de prix accessible aux investisseurs. Pour information, le prix des séchoirs à convection naturelle commercialisés au Burkina Faso est de 1 500 € pour un équipement à 2 compartiments comprenant chacun 10 claies (5 kg de pulpe fraîche par claie ; 20 kg de

mangues sèches produites par cycle de 24 heures). La majorité des installations de production comportent au moins 4 séchoirs.

Être rentable pour l'entreprise

Pour juger de la rentabilité d'un séchoir, on peut calculer le temps de retour sur investissement. Il se définit comme la période de temps minimale théoriquement nécessaire pour récupérer l'investissement initial sous forme de flux de trésorerie, en se basant sur les recettes totales moins les coûts et amortissements. D'une manière imagée, on peut dire que c'est le temps nécessaire pour que la somme des bénéfices de l'entreprise soit égale au montant de l'investissement.

Pour un nouvel équipement, le temps de retour doit être inférieur ou égal à celui d'un séchoir classique.

À titre d'exemple, une réduction importante de la durée de séchage peut permettre de faire plus d'un cycle par jour. Cependant, cela impose une organisation du travail différente, qui n'est pas forcément acceptable (travail de nuit, en 3 équipes de 8 heures, etc.).

Un autre critère peut être la marge dégagée par kilogramme de mangues fraîches. Elle se calcule en divisant les ventes moins les coûts par le nombre de kilogrammes de mangues fraîches achetées. Dans les coûts, on doit normalement faire entrer toutes les composantes : matières premières, gaz, produits de nettoyage, salaires, location, amortissement, frais bancaires…

Être « pilotable » par les opérateurs

Les conducteurs de séchoir doivent pouvoir gérer l'ensemble des phases de séchage et disposer d'indicateurs pour cela.

Être adapté aux énergies locales

Disponibilité des énergies

L'une des énergies pratiques à utiliser est le gaz. D'un pouvoir calorifique identique à celui du gasoil (45 600 kJ par kg de gaz butane), deux fois plus important que celui de la biomasse (bois), le gaz présente l'avantage suivant : l'air issu de sa combustion peut être mélangé avec l'air de séchage. Toute l'énergie dégagée par la combustion est ainsi transférée à l'air sous forme de température. La combustion de gasoil ou de biomasse nécessite l'utilisation d'organe d'interface (échangeurs) pour céder l'énergie des gaz de combustion à l'air de séchage. De plus, il est aisé de s'approvisionner en gaz sous différentes formes (réseau collectif, bouteilles), et cela dans de nombreux pays.

L'électricité est aussi d'utilisation très pratique. Le chauffage de l'air de séchage peut se faire par léchage de celui-ci sur des résistances électriques, sans aucun risque de pollution de l'air. Mais la disponibilité de l'électricité reste aujourd'hui encore très aléatoire dans de nombreuses zones géographiques, surtout pour le niveau de puissance exigé dans les unités de séchage.

Coût des énergies

Le coût des énergies pour une unité de séchage peut énormément varier en fonction de son origine (énergies fossiles ou biomasse, électricité d'origine renouvelable, nucléaire ou par groupe électrogène) et de son utilisation (en direct ou en indirect). Le principe de transfert de l'énergie à l'air de séchage, et par conséquent le coût d'acquisition du séchoir et son coût d'utilisation, dépend également du type d'énergie.

Être aux normes de sécurité

Une attention particulière doit être portée sur l'utilisation du gaz comme énergie. Des explosions ou incendies pourraient avoir pour origine une extinction de flamme (fuite de gaz induite) ou la présence d'un corps combustible près d'une flamme. En convection naturelle, le risque lié à une extinction de flamme est cependant limité car la puissance de chauffe est relativement faible.

L'intensification du séchage (par ajout d'une ventilation) conduit à une augmentation du débit de gaz. Les risques, suite à une extinction de flamme ou à une variation du débit d'air, sont sensiblement accrus. Le niveau de risque dépend aussi fortement de la régularité de l'approvisionnement en électricité alimentant le ventilateur.

Être fabricable localement

L'intérêt d'une fabrication locale est multiple : le prix de revient est moindre, la capacité de diffusion et de maintenance augmentée, et la production locale d'équipements renforcée.

Propositions fonctionnelles pour un séchoir ventilé

Dans le cas d'un séchoir ventilé (à convection forcée), des réponses techniques doivent être apportées pour chacune des fonctions précédemment listées.

Fonction « sécher des mangues »

Comme cela a été dit plus haut, l'intégration de ventilation forcée dans un équipement de séchage modifie positivement les critères du séchage et la qualité de la mangue séchée.

Pour mettre en œuvre ce principe de ventilation forcée, la première réponse technique est d'implanter un ventilateur dans l'équipement. Autour de ce composant, il faut organiser un circuit d'air qui regroupe le ventilateur lui-même, l'élément de chauffage de l'air, des admissions et des extractions d'air, des organes de contrôle et de commande…

Pour sécher, il faut apporter de l'énergie et la transmettre au produit à déshydrater. Pour ne pas trop s'éloigner des technologies couramment utilisées et remplir la fonction d'adaptation à l'énergie, l'apport d'énergie par combustion de gaz butane est conseillé.

La mangue est un produit qui se déshydrate selon deux phases très distinctes : une phase de perte d'eau libre, au cours de laquelle il est possible de monter haut en température (jusqu'à 80-90 °C), et une phase de perte de l'eau liée, où la température ne doit pas dépasser 40-50 °C afin d'éviter le risque de brunissement (non enzymatique, type réaction de Maillard). Le passage d'une phase à l'autre est critique et doit pouvoir être bien maîtrisé (respect de la fonction « être pilotable ») : c'est la garantie pour avoir une mangue séchée de bonne qualité.

Sans trop augmenter son coût (montage de capteurs d'humidité relative, très chers et fragiles) et pour améliorer sa robustesse (respect de la fonction « être rentable »), il est possible de conduire le séchoir avec les éléments suivants :
– température de l'air avant produit (Tav) ;
– température de l'air après produit (Tap) ;
– commande de la puissance de chauffe ;
– commande du débit de renouvellement d'air dans le séchoir.

La différence de température (Tav – Tap) est une indication du débit évaporatoire du séchoir. Lorsque la différence des températures de l'air avant et après produit est supérieure à un seuil, on peut considérer que l'on est en phase de forte évaporation, donc en phase (1) (perte d'eau libre). Lorsqu'elle devient inférieure à ce seuil, son évolution est ensuite rapide. La première phase de séchage est donc finie et il faut baisser la température. Des capteurs et indicateurs de température à un prix abordable, lisibles et s'installant facilement sur l'équipement sont assez faciles à trouver sur le marché.

L'humidité finale du produit, comme souligné précédemment, est un facteur capital pour la qualité de la mangue séchée et aussi pour la rentabilité de l'entreprise. Les conducteurs de séchoir traditionnel maîtrisent relativement bien la fin du séchage, par expérience, au toucher et de visu. Mais ils sont souvent amenés à prolonger le séchage afin que des tranches, particulièrement les plus épaisses, soient sèches. Les tranches plus fines sont alors trop sèches.

Mis à part l'homogénéité de séchage apportée par la ventilation, il faut veiller à faire une découpe de tranches d'épaisseur homogène.

> Outil de découpe

- Un outil de découpe professionnel, de type « mandoline », permet d'obtenir des tranches d'une parfaite régularité d'épaisseur. Il se trouve en inox (qualité alimentaire, facilité de nettoyage) et possède un système de réglage de l'épaisseur de 0 à 12 mm.
- L'outil de découpe doit impérativement être associé à des gants de protection pour les opérateurs de découpe.

Fonction « être rentable pour l'entreprise »

La construction du séchoir doit pouvoir se faire à partir de matériaux locaux. Il faut se rapprocher le plus possible du coût « psychologique » des séchoirs actuellement les plus couramment commercialisés, tout en gardant des capacités de traitement proches (nombres de claies et poids de pulpe à traiter du même ordre).

Fonction « être pilotable par les utilisateurs »

Des indicateurs de température peuvent permettre le suivi des phases de séchage. Ils constituent des éléments d'aide au pilotage du séchoir.

Pour maîtriser le rendement thermique du séchoir, il est nécessaire de pouvoir définir la puissance de chauffe à partir des indications de température. Un opérateur expérimenté pourra le faire en voyant la hauteur des flammes sur le brûleur. Cependant, dans la phase d'acquisition de la maîtrise du séchoir, ou pour des opérateurs moins expérimentés, une indication de puissance est nécessaire. Cette indication peut être apportée par un manomètre qui affiche les différentes valeurs de pression lors de l'action sur un détendeur réglable.

Une courbe peut ainsi être établie pour relier la pression à la puissance fournie.

Fonction « être adapté aux énergies locales »

En séchage par entraînement à l'air chaud, le gaz est très utilisé car les normes en vigueur, locales comme internationales, autorisent la combustion directe

du gaz pour le séchage des produits alimentaires, et parce que le transfert de chaleur à l'air a un rendement maximal sans nécessiter une chaudière ou un échangeur.

Pour le ventilateur, une alimentation électrique est nécessaire.

Fonction « être aux normes de sécurité »

Compte tenu des risques liés aux flammes, il est impératif d'équiper le séchoir d'une installation de sécurité prenant en compte tous les cas de figures possibles, et respectant les contraintes budgétaires et de disponibilité des différents éléments. Le schéma de sécurité présenté figure 7 utilise des composants simples et faciles à trouver.

L'installation est composée de deux circuits.

1) Un circuit de gaz à partir de la bouteille, avec les éléments suivants :
– un détendeur à pression variable ;
– un manomètre de visualisation de la pression réglée par le détendeur (nécessaire au pilotage du séchoir) ;
– un robinet de sécurité piloté par une sonde thermocouple, un thermostat de détection de température anormalement haute dans le séchoir et un relais indicateur de la présence d'alimentation électrique pour le ventilateur ;
– un brûleur avec gicleur intégré.

La sonde thermocouple à interrupteur, en combinaison avec le robinet, fonctionne de la façon suivante : l'opérateur exerce une pression pendant 15 secondes sur la manette du robinet en position ouverte après allumage du brûleur ; le thermocouple chauffé par le brûleur génère un microcourant dans un solénoïde intégré au robinet. Au bout des 15 secondes, la pression sur la manette peut être relâchée, le brûleur reste allumé (le clapet du solénoïde reste en position « ouvert »). Dès que la flamme s'éteint, le microcourant n'est plus

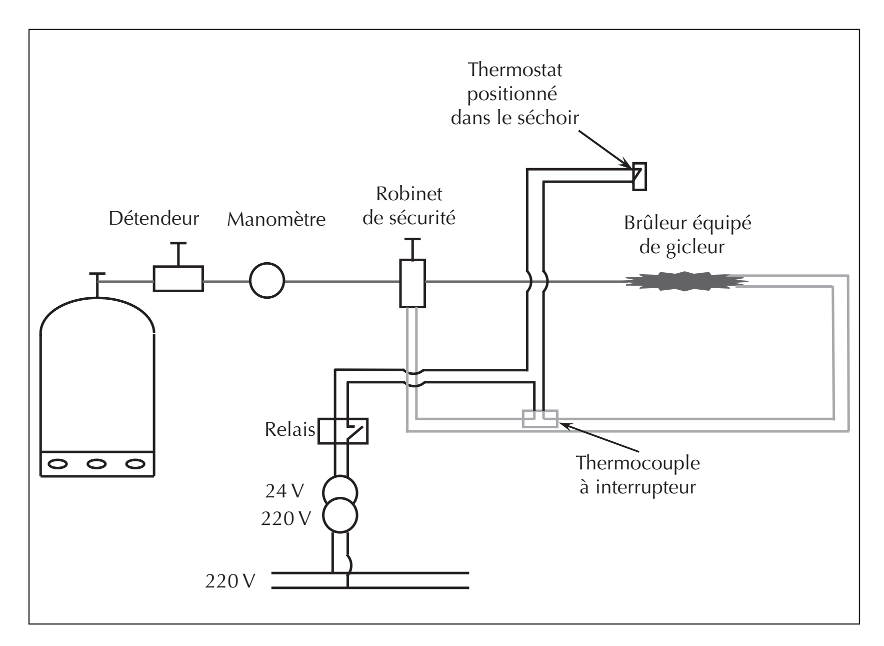


Figure 7. Circuits de sécurité.

généré et le clapet du solénoïde revient en position « fermé ». L'alimentation en gaz est ainsi coupée.

2) Un circuit électrique basse tension. Sur une prise 220 volts monophasée, se branche une alimentation non stabilisée (transformateur) avec sortie en 24 volts, elle-même reliée à un relais « normalement ouvert » : lorsque le relais n'est pas alimenté électriquement (coupure électrique), le contact est ouvert, c'est-à-dire que le circuit constitué est interrompu. Le relais est le premier de trois composants montés en série sur le circuit. Le deuxième est le thermostat à réarmement manuel, qui « s'ouvre » lorsque la température dans le séchoir s'élève au-delà de 90 °C. Le troisième est l'interrupteur de la sonde thermocouple, qui lui aussi est ouvert lorsque le brûleur est éteint ou s'ouvre lorsque le brûleur s'éteint.

> Risques liés aux flammes

- À ce jour, très (trop) peu d'installations de séchage par combustion de gaz sont équipées d'organes qui garantissent la sécurité des opérateurs, des équipements et des infrastructures. Des explosions ou des feux peuvent avoir pour origine une extinction de flamme ou la présence de corps combustibles près d'une flamme.
- Une modification de la conduite du séchoir comme celle qui accompagne un séchoir ventilé à recirculation peut entraîner une accumulation de gaz dans la chambre de séchage en cas d'extinction de flamme ou d'une forte élévation de température.
- Les brûleurs risquent d'être plus facilement éteints par la circulation d'air produite par le ventilateur. En cas de rupture de l'alimentation électrique, ce même ventilateur s'arrête et il peut se produire une surchauffe de l'air.
- Les risques liés à une extinction de flamme ou à une variation du débit de l'air sont donc très sensiblement accrus. Et le niveau de risque dépend fortement de la régularité de l'approvisionnement en électricité.

Fonction « être fabricable localement »

On a vu plus haut l'intérêt d'une fabrication locale. Pour les équipements techniques comme le ventilateur, un approvisionnement local garantira un prix raisonnable et surtout la possibilité de remplacement en cas de défectuosité.

Pour le reste, tout doit être réalisé dans des matériaux vendus localement, essentiellement du bois massif et du bois contreplaqué, ainsi que de la tôle et du profilé noir. Ces recommandations sont dépendantes des obligations que peuvent imposer les clients. Par exemple, on peut craindre une demande d'utilisation de claies en inox ou en matière synthétique, bien que les claies en bois et les moustiquaires garantissent une bonne qualité alimentaire et un nettoyage efficace.

Proposition d'un séchoir ventilé

Les chercheurs du Cirad ont identifié les problèmes techniques des installations existantes et ont souhaité apporter des solutions techniques aptes à satisfaire deux fonctions principales du séchoir considérées comme les plus importantes : sécher les mangues avec amélioration de la qualité et augmenter le rendement thermique.

L'intégration d'une ventilation forcée avec recyclage de l'air dans le séchoir doit permettre une augmentation reproductible du pourcentage de mangue séchée

de qualité export, tout en améliorant le rendement thermique (d'une valeur proche de 60 %) et en abaissant la durée de séchage (de 20 à 12 heures).

L'air pulsé, chauffé par combustion directe de gaz, se déplace selon une direction parallèle à la surface des claies pour « lécher » le produit. Ce dernier, découpé en faible épaisseur, présente à l'air chaud une grande surface d'échange.

Une fonction importante doit être assurée dans le développement du séchoir : l'équilibrage des flux d'air. L'objectif est d'obtenir un séchage homogène sur les différentes claies, afin d'éviter leurs permutations.

Lors du développement du nouveau séchoir CSec-L® (Cirad séchoir à flux d'air par Léchage), il a été choisi de réaliser l'équilibrage des vitesses d'air dans la cellule par un dispositif aux pertes de charges bien étudiées et réparties.

Le premier élément est un ventilateur centrifuge caractérisé par un débit d'air de 1 500 m^3/h dans le séchoir et des vitesses associées de 0,5 m/s sur le produit, valeurs assurées sous les pertes de charges aérauliques de l'installation. Le moteur est situé en dehors de l'air de séchage, ce qui lui assure une bonne longévité malgré le brassage d'air à 80 °C. Une fabrication locale du ventilateur peut être envisagée mais peut avoir une incidence sur les performances aérauliques et sur la consommation énergétique.

Le deuxième élément qui a été adopté pour l'équilibrage est un système qui crée des pertes de charges dans le séchoir : une distribution par plénum, volume de section aéraulique suffisamment importante pour que la pression soit homogène à l'intérieur. Le passage du plénum à la chambre de séchage s'effectue par des orifices (perçages) qui garantissent une mise en pression du plénum et une répartition homogène. Ce principe a été prévu en amont des claies (soufflage) et en aval de celles-ci (aspiration), afin d'obtenir un système symétriquement équilibré.

Le nombre et le diamètre des perçages ont été déterminés pour assurer des caractéristiques d'air identiques à tout endroit de la chambre de séchage, tout en réduisant les pertes de charges au minimum.

Le séchoir a été conçu afin d'intégrer des contraintes économiques, ergonomiques et de sécurité. L'idée principale a été de construire l'équipement autour de 12 claies intégrées dans une chambre de séchage. Les deux plénums de soufflage et d'aspiration sont situés sur les côtés du séchoir. La liaison des plénums avec le ventilateur (aspiration et refoulement) se fait par deux caissons indépendants situés sur le dessus du séchoir. Le ventilateur et les gaines métalliques de ventilation, ainsi que le brûleur, sont positionnés sur le toit du séchoir. On limite ainsi les risques en cas d'éventuels problèmes de surchauffe et le dessous du séchoir est libéré pour la manutention.

L'admission d'air « neuf » (environ 300 m^3/h en phase (1) de séchage) se fait par un orifice calibré, positionné immédiatement en amont de l'ouïe d'aspiration du ventilateur. Par ce même orifice, les gaz de combustion du brûleur se mélangent à l'air neuf : les deux fonctions de réchauffage et de renouvellement de l'air de séchage sont ainsi assurées.

L'extraction d'air se fait par une trappe réglable située sur le dessus du séchoir et du plénum d'aspiration.

L'ensemble forme un équipement très compact ; la construction devient plus aisée et le coût de fabrication réduit.

Les plans du séchoir CSec-L® sont présentés en annexe.


Fiches techniques

Fiche technique 1

Mesures et unités de mesure dans l'élaboration de la mangue séchée

Humidité relative de l'air

Pour définir l'état d'humidité d'un air considéré, on se réfère à l'air saturé (fiche technique 5), à la même température. On appelle humidité relative (degré hygrométrique), le rapport

$$Hr = \frac{\text{Pression de vapeur d'eau dans un air}}{\text{Pression de vapeur d'eau d'un air saturé d'eau à la même température}},$$

exprimé en pourcentage (%).

Pour l'air sec (théorique), Hr = 0 % car, quelle que soit la température, le numérateur du rapport est nul.

Pour l'air saturé, Hr = 100 %.

Puissance calorifique d'un brûleur

La quantité de chaleur (Q) que fournit un brûleur au séchoir peut être mesurée en pesant la bouteille de gaz. On considère qu'un kilogramme de gaz butane apporte environ 46 000 kJ. On a alors

Q = différence de poids de gaz en kg × 46 000, avec Q en kJ.

La puissance calorifique d'un brûleur (P) est la quantité de chaleur apportée en une seconde. On peut la calculer comme

P = Q/(3600 × temps entre les pesées en h), avec P en kW.

À titre d'exemple, pour un séchoir pour lequel on a relevé une consommation de 1 kg de gaz butane en 2 h, la puissance calorifique P a été de

P = 46 000/(3600 × 2) = 6,4 kW.

Il est possible de se faire une idée approximative du débit d'air ($\dot{M}$) chauffé à partir de la puissance fournie par le brûleur telle que déterminée ci-dessus (P) et des températures d'air avant (T_{avant}) et après ($T_{après}$) brûleur, par la formule

$$\dot{M} = \frac{P}{T_{après} - T_{avant}} \quad \text{(avec } \dot{M} \text{ en kg d'air/seconde),}$$

la capacité thermique massique de l'air étant proche de 1 kJ × k^{-1} × T^{-1}.

Rendement énergétique du séchoir

Le rendement énergétique d'un séchoir R indique la proportion de l'énergie apportée (gaz) qui a été utile pour enlever l'eau du produit. Il se calcule comme

$$R = \frac{(\text{Poids des produits humides} - \text{poids des produits secs}) \times 2\,250}{(\text{Poids de la bouteille en fin de séchage} - \text{poids de la bouteille en début de séchage}) \times 46\,000}.$$

Par exemple, si, pour 2 séchoirs alimentés par une bouteille, il a été introduit 200 kg de tranches de mangues qui ont donné 40 kg de mangues sèches (soit 160 kg d'eau enlevés), et que la consommation de gaz a été de 20 kg (une bouteille complète et environ la moitié d'une autre), le rendement énergétique a été de 39 % environ.

Teneur en eau de la mangue

La teneur en eau ou l'humidité d'un produit, notée H, est généralement considérée comme le rapport de la masse d'eau contenue dans ce produit sur la masse totale de ce même produit. Elle est exprimée en grammes d'eau pour 100 g de matière humide ; l'unité est %MH (matière humide) ou %BH (base humide).

$$H = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse totale du produit}} \times 100$$

Pour la pulpe de mangue, la teneur en eau est de 80 à 85 %MH.

Pour la mangue séchée, la teneur en eau recommandée est de 12 à 15 %MH.

Attention : les chercheurs qui travaillent en séchage et certains opérateurs économiques expriment la teneur en eau ou l'humidité sur base sèche. Ils la notent Ns ou X et l'unité est %MS (matière sèche) ou %BS (base sèche). On a la relation

$$Ns\ (\%MS) = \frac{\text{Masse d'eau } (\%MH)}{\text{Masse de matière sèche}} \times 100$$

$$\text{et } Ns\ (\%MS) = \frac{H\ (\%MH)}{(100 - H\ (\%MH))} \times 100$$

Rendement en pulpe de la mangue

Le rendement en pulpe est le rapport de la masse de pulpe sur la masse initiale du produit (mangues fraîches). La masse de pulpe s'obtient après épluchage et dénoyautage. Cette valeur s'exprime en pourcentage (%). Le tableau 3 présente le rendement en pulpe de quelques variétés, selon les données bibliographiques.

Tableau 3. Rendement en pulpe de quelques variétés.

Variété	Poids moyen (g)	Rendement en pulpe (%)
Amélie	350	40-50
Lippens	400	35-40
Brooks	400	30-40
Kent	800	40-50

Rendement de séchage

Le rendement de l'opération de séchage est le rapport de la masse de mangues séchées sur la masse de pulpe. Il est exprimé en %.

$$Rs = \frac{\text{Masse de mangues séchées}}{\text{Masse de pulpe}} \times 100$$

Rendement global de transformation

Le rendement global de transformation est le rapport de la masse de mangues séchées sur la masse initiale du produit (mangues fraîches). Il est exprimé en %.

$$Rt = \frac{\text{Masse de mangues séchées}}{\text{Masse initiale de produit}} \times 100$$

Ce rapport est environ de 10 % (rapport constaté sur des mesures en unités au Burkina Faso).

Quelques unités et valeurs utilisées

Unité d'énergie : joule noté J

Unité d'énergie : calorie notée cal

1 cal = 4,18 J

Unité de puissance : watt noté W

1 000 W = 1 kW

1 kWh = 3 600 kJ

Fiche technique 2

Notion de disponibilité et d'activité de l'eau dans la mangue

La mangue est un fruit riche en eau (80 à 85 g d'eau pour 100 g de mangue). Cette eau est plus au moins disponible et l'on emploie les expressions eau libre et eau liée pour exprimer cela.

Eau libre

L'eau libre se trouve dans la mangue mais elle n'est pas liée aux composants de la mangue (les sucres, les protéines et les vitamines). Cette eau se comporte comme l'eau pure et par conséquent elle s'évapore facilement. La présence de cette eau dans la mangue rend cette dernière très périssable parce qu'elle est accessible aux micro-organismes et favorise les réactions biochimiques et physico-chimiques.

Eau liée

Contrairement à l'eau libre, l'eau liée est relativement fixée aux composants de la mangue, par adsorption. Elle est donc difficilement évaporable. Elle est en revanche moins accessible aux micro-organismes et aux dégradations biochimiques et physico-chimiques.

La disponibilité de l'eau varie en fonction de la teneur en eau et de la composition biochimique de la mangue. Elle est quantifiée par une grandeur dite activité de l'eau, notée aw.

Activité de l'eau

L'activité de l'eau se définit par rapport à un état de référence qui est celui de l'eau pure, pour laquelle l'activité de l'eau est égale à 1. Elle correspond au rapport entre la pression de vapeur d'eau de l'aliment et la pression de vapeur de l'eau pure à la même température. La valeur de l'aw varie de 0 (produit sec au point que toute l'eau est liée à l'aliment et donc sans qualité réactive) à 1 (toute l'eau est libre).

Dans les produits alimentaires très hydratés tels que la mangue, une partie très importante de l'eau est sous forme d'eau libre (en surface de produit ou dans des poches) et d'eau faiblement absorbée retenue par capillarité dans les tissus du produit.

Ces différents types d'eau conditionnent le séchage des mangues, qui se fractionne en trois phases.

Séchage des mangues en trois phases

La phase (0) est courte, elle correspond à la montée en température du produit jusqu'à atteindre la température de l'équilibre.

La phase (1) correspond à l'évaporation de l'eau libre (aw = 1) en surface de produit, sans cesse renouvelée par l'eau venant de l'intérieur du produit. La vitesse de séchage de cette période est constante. Cette vitesse peut être accélérée en augmentant la vitesse de circulation de l'air au contact du produit.

La phase (2) correspond à l'évaporation de l'eau liée. Pendant cette période, la vitesse de séchage ralentit. Plusieurs phénomènes expliquent ce ralentissement :
– le ralentissement commence lorsqu'il n'y a plus d'eau libre à la surface du produit et qu'il ne reste que l'eau liée à évaporer ;
– l'évaporation de l'eau dans un milieu varie avec sa teneur en eau ; en effet plus le produit est sec, moins il est perméable à l'eau ;
– la résistance des parois cellulaires, lorsqu'elles n'ont pas été altérées par une cuisson ou un blanchiment, contribue sans doute à freiner l'alimentation de la surface en eau.

Fiche technique 3

Le brunissement de la mangue séchée

Le brunissement de la mangue est un phénomène qui affecte la qualité organoleptique du produit. Il existe différents types de brunissement.

Brunissement enzymatique

Par définition, le brunissement enzymatique correspond à la transformation de certains composés de la mangue en composés colorés, le plus souvent noirs ou bruns, par le biais des enzymes. Le brunissement enzymatique est favorisé par :
– l'oxygène ;
– un pH entre 5 et 7 (basique) ;
– des manipulations qui blessent le produit (chocs, épluchage, parage…).

Il est réduit par :
– un abaissement de l'activité de l'eau ;
– les traitements thermiques à des températures supérieures à 65 °C (blanchiment) ;
– un pH bas (acide) ;
– l'acide ascorbique.

Brunissement non enzymatique

Le terme brunissement non enzymatique désigne un ensemble très complexe de réactions aboutissant, dans la mangue séchée, à la formation de pigments noirs et bruns, et souvent à des modifications indésirables de l'odeur et de la saveur. Ces réactions sont appelées aussi « réactions de Maillard ». Ce brunissement se déroule en deux phases principales :
– la phase d'accumulation des composés réactifs à partir de sucres et d'acides aminés ;
– la phase de brunissement sous l'action des composés accumulés dans la première phase.

Le brunissement non enzymatique se manifeste lors du séchage de manière plus ou moins rapide, selon la sévérité du traitement. Toutefois, à cause de la possibilité d'accumulation de composés réactifs, un brunissement non enzymatique peut se révéler et s'intensifier au fil des jours et des mois qui suivent le traitement, alors qu'il n'était pas visible tout de suite après.

Les réactions du brunissement non enzymatique sont favorisées par :
– la présence de sucres réducteurs et d'acides aminés ;
– une activité de l'eau entre 0,5 et 0,7 ;
– une température élevée (50 à 60 °C) ;
– une grande durée du traitement thermique ;
– un pH entre 1 et 7 ;
– certains métaux (fer, cuivre) et des acides organiques comme l'acide ascorbique.

Fiche technique 4

Notions de températures liées au séchage

Température sèche – Température humide – Température de rosée

La température de thermomètre sec ou température sèche d'un air est celle normalement mesurée. Il faut la différencier des températures humides et de rosée, définies ci-dessous.

La température humide est la température que prend, à l'équilibre, une faible quantité d'eau liquide placée dans une grande quantité d'air que l'on souhaite caractériser. Elle est inférieure ou égale à la température sèche. Elle peut être déterminée en utilisant un diagramme enthalpique de l'air humide car elle est très proche de la température de saturation isenthalpique. Elle peut être mesurée en plaçant un thermomètre enrobé d'un coton humide dans l'air. Le suivi de la température montre d'abord une élévation (1), puis un plateau (2) et enfin une nouvelle élévation (3) se terminant à la température sèche. La température humide est celle indiquée par le thermomètre pendant la phase de plateau. Durant cette phase, toute l'énergie transférée par l'air à l'eau est consommée pour la vaporisation de l'eau (c'est le principe qui est utilisé pour refroidir l'eau contenue dans les jarres poreuses dans les villages, ou l'eau des outres que les camionneurs placent face au vent pendant le voyage). Un parallèle peut être fait avec la stabilité de la température de l'eau en ébullition.

La détermination des températures sèches et humides est un moyen efficace et peu cher de caractériser l'air en différents points d'un séchoir.

La température de rosée correspond à la température à laquelle il faut amener l'air pour voir apparaître la première goutte d'eau de condensation (ou de rosée).

Sur un corps (paroi de séchoir), on peut voir apparaître de la condensation si la température de ce dernier est égale à la température de rosée de l'air environnant.

Pour un air donné, les températures sont parfaitement déterminées et sont toujours dans l'ordre suivant : température de rosée < température humide < température sèche.

Lors du séchage des mangues, les thermomètres indiquent les températures sèches en différents lieux du séchoir. Pendant la phase (1) du séchage, les produits sont à une température plus faible que celle lue, et qui correspond à la température humide. Lorsque l'air de séchage passe sur un corps froid et que des gouttes de condensation apparaissent à la surface de ce corps, on dit que le corps est à une température inférieure (ou égale) à la température de rosée de l'air.

Par exemple, à l'aide d'un diagramme de l'air humide, on détermine ces températures de la façon suivante : un air à 55 °C et 20 % d'humidité relative a une température sèche de 55 °C, une température humide lue sur diagramme de 31,5 °C et une température de rosée lue sur diagramme de 27 °C.

Fiche technique 5

Humidité relative de l’air et teneur en eau des produits

L’humidité relative d’un air est le rapport entre la masse de vapeur d’eau contenue dans cet air et la masse maximale de vapeur d’eau que peut contenir l’air. Lorsque l’air atteint son humidité maximale, on dit qu’il est saturé. On aperçoit alors des gouttelettes sous forme de brouillard, de pluie, de rosée, de vapeur, de nuage.

Un air parfaitement sec (contenant 0 g d’eau) a une humidité relative de 0 %.

Un air saturé a une humidité relative de 100 % (c’est presque le cas d’un air atmosphérique avant une pluie).

Lors du séchage, l’air a d’autant plus de capacité à absorber l’eau contenue dans les produits que son humidité relative est faible.

La teneur en eau d’un produit est le rapport de la masse d’eau contenue dans ce produit sur la masse totale de ce même produit. Elle est exprimée en gramme d’eau pour 100 g de matière humide, et notée %MH ou %BH.

La pulpe de mangue fraîche a une teneur en eau de 85 %BH en moyenne. Cela signifie que la pulpe contient 85 % d’eau et 15 % de matière sèche ou que, dans 100 g de pulpe de mangues, on a 85 g d’eau et 15 g de matière sèche.

La valeur requise pour la teneur en eau des mangues en conservation (sans additifs ni solutés) est de 12 à 15 %. Au-delà, elles ne sont pas stables (elles peuvent « moisir »). En dessous de ces valeurs, il y a une incidence sur la rentabilité de l’entreprise de séchage (on perd du poids, et donc de l’argent).

Fiche technique 6

Techniques du séchage

Pour sécher, il faut que l'air soit plus sec que le produit, c'est-à-dire que l'humidité relative de l'air soit inférieure à l'activité de l'eau en surface du produit. L'objectif du séchage étant de stabiliser le produit à une activité d'eau inférieure à 0,65, on utilise en général de l'air dont l'humidité relative est inférieure à 50 %. Par ailleurs, il est nécessaire que l'air conserve une capacité de séchage après être passé sur quelques pièces de mangues.

L'air atmosphérique est parfois trop humide pour permettre d'obtenir un produit sec. Par ailleurs, son humidité relative dépasse 60 % pour une quantité d'eau ajoutée faible. Le chauffage permet de réduire fortement l'humidité relative d'un air et augmente sensiblement la quantité d'eau qu'il peut recevoir, avant qu'il ne puisse plus sécher efficacement les produits. Le diagramme de l'air humide permet de représenter et de quantifier ces phénomènes.

Exemples :
– en période sèche, un air à 35 °C et 20 %HR permet d'obtenir des mangues sèches mais son humidité relative atteindra 60 % dès qu'il se sera chargé d'environ 5 g d'eau. Si on le chauffe à 70 °C, il pourra fixer environ 16 g d'eau avant d'atteindre 60 %HR ;
– en période humide, l'air à 35 °C et 80 % d'humidité relative est trop humide pour le séchage. Si on chauffe cet air à 70 °C, son humidité relative passe à 14 % d'humidité relative. L'air ainsi chauffé est efficace pour le séchage.

C'est la raison pour laquelle la première partie d'un séchoir correspond toujours au système de chauffage de l'air. La seconde partie est la chambre de séchage où sont exposés les produits à sécher et où l'air chauffé sera pulsé et judicieusement réparti sur les produits.

En résumé, on peut dire :
– l'air extérieur est en règle générale froid et possède une faible capacité évaporatoire ;
– après chauffage, il est chaud et sa capacité évaporatoire est élevée ;
– après passage sur les produits à sécher, il est tiède et sa capacité évaporatoire est faible.

Fiche technique 7

Pourquoi et quand recycler l'air dans un séchoir

Le recyclage de l'air présente deux intérêts majeurs : l'amélioration de l'homogénéité du séchage et l'augmentation du rendement thermique.

L'homogénéité du séchage est améliorée par une alimentation de toutes les claies en même temps alors que, en convection naturelle, il est nécessaire que l'air passe successivement sur plusieurs claies pour une bonne utilisation de l'énergie. Dans cette seconde configuration, des permutations sont nécessaires entre les claies qui reçoivent l'air venant directement du brûleur et celles recevant de l'air qui a déjà été en contact avec des produits. Dans les deux configurations, des permutations « avant/arrière », c'est-à-dire des retournements vis-à-vis du sens d'écoulement de l'air sont utiles car la partie de la claie recevant l'air sèche plus vite.

Le principal coût du séchage, hors amortissement des équipements, est l'énergie.

Au début du séchage, le recyclage a peu d'effet sur le rendement thermique. En effet, les produits sont si humides que presque toute l'énergie de l'air disponible pour évaporer de l'eau est utilisée, que ce soit en convection naturelle ou avec un recyclage. Il est cependant possible qu'une différence existe du fait de la difficulté de provoquer, en convection naturelle, un mélange entre l'air au contact du produit et le reste. Dans cette configuration, toute structure gênant l'avancement de l'air conduit à une baisse sensible de son débit.

Après quelques dizaines de minutes de séchage, l'effet du recyclage de l'air sur le rendement énergétique devient important. En convection naturelle, la surface des produits initialement proche du brûleur n'est plus saturée d'eau. L'air se charge moins d'eau à leur contact et, en combinant cela avec un mélange de l'air peu efficace, une partie de l'énergie est évacuée sans être utilisée. Avec un recyclage de l'air, il est possible de régler le séchoir pour n'extraire que la quantité d'air nécessaire et permettant un bon rendement thermique.

En phase d'extraction de l'eau liée, l'air est peu modifié lors de son passage au contact des produits. Le rejeter dans cet état constitue une perte qui ne se justifie pas. Le recyclage pour récupérer l'énergie ainsi gaspillée consiste à ramener tout ou partie de l'air rejeté vers l'entrée du séchoir pour le faire repasser sur les produits. Cet air peut être ramené au préalable à l'entrée du système de chauffage pour lui redonner des caractéristiques de séchage encore meilleures, en consommant peu d'énergie.

L'utilisation du recyclage en fin de séchage peut permettre d'économiser près de 50 % de l'énergie de chauffage de cette phase.

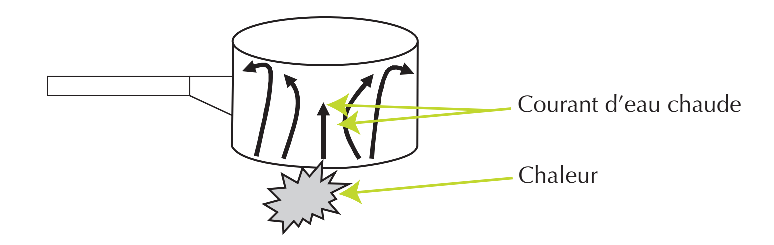
Le recyclage est réalisé par un réseau de gaines et de trappes, judicieusement disposées pour soit rejeter l'air utilisé à l'extérieur, soit le ramener à l'entrée du séchoir.

Fiche technique 8

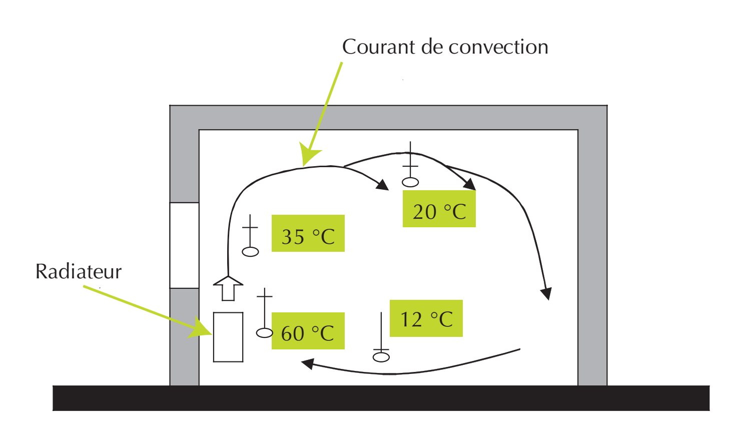
Mécanisme d'échange entre l'air et le produit – Notion de convection naturelle

La densité des liquides et des gaz diminue lorsqu'on les chauffe, comme dans les deux exemples présentés ci-dessous.

Dans un récipient, le fond chauffe au contact de la flamme, puis l'eau chauffe à son tour. Étant devenue plus légère, elle s'élève et est remplacée par l'eau plus froide, un courant s'établit.



Dans un local chauffé par un radiateur, l'air s'élève au contact de ce dernier, car sa température a augmenté ; de l'air plus froid vient le remplacer, il s'établit un courant de convection. La chaleur cédée par le radiateur est véhiculée vers les zones plus froides.



Le mouvement est provoqué par des différences de masse volumique, elles-mêmes induites par des différences de température. Il résulte un mouvement vertical de l'air sans aucune action mécanique extérieure. La vitesse de circulation de cet air est fonction des différences de température. Cependant, les forces responsables des mouvements de l''air sont faibles. Tout obstacle à

la libre circulation diminue fortement les mouvements. Il y a peu de mélange d’air et il est difficile d’en créer en l’absence de ventilateur.

En chauffant de l’air, son humidité relative diminue, sa capacité à pouvoir absorber de l’eau sous forme de vapeur augmente. En contact avec un produit, cet air lui cède de la chaleur et se charge de vapeur d’eau provenant du produit alors que le produit perd son humidité et se réchauffe (phase (2) du séchage).

En conséquence, cette baisse de la température entraîne celle de la vitesse de circulation de l’air.

Le séchage est relativement lent, essentiellement du fait de l’absence du renouvellement de l’air au contact du produit.



Manuel de production

Préparation de campagne

Fiche de prévision de production

La fiche de prévision de production permet au responsable de l'unité de préparer une campagne de séchage en fonction des commandes prévues, mais aussi, pour les unités ayant déjà eu une production, en fonction des données des années précédentes (pertes de matières premières, capacité de production, rendement en Q1, consommation énergétique).

Comment remplir cette fiche ?

Prévision de commercialisation : quantités (en kg) de mangues de qualité Q1 et Q2 à livrer aux clients.

Nombre de jours de production prévus durant la campagne.

Approvisionnement

Quantité de mangues traitées : quantité (en kg) de mangues fraîches traitées en séchage pour obtenir la quantité prévisionnelle de commercialisation.

Perte de mangues fraîches : quantité (en kg) de mangues fraîches qui ne seront pas traitées en séchage (mauvaise qualité pour le séchage). Cette information provient des données recueillies les années de production précédentes.

Quantité de mangues à livrer : quantité (en kg) de mangues fraîches à prévoir au cours de la campagne = somme des 2 lignes précédentes.

Production

Nombre de bouteilles de gaz à prévoir au cours de la campagne.

Nombre de sachets qui seront utilisés pendant toute la campagne (mettre autant de colonnes que de types de sachets différents).

Nombre de cartons qui seront utilisés pendant toute la campagne (mettre autant de colonnes que de types de cartons différents).

▸▸ *Fiche 1*

PRÉVISION DE PRODUCTION

ANNÉE CAMPAGNE : ....

1. PRÉVISION DE COMMERCIALISATION

	Q1	Q2
kg livrés		

2. NOMBRE DE JOURS DE PRODUCTION

3. APPROVISIONNEMENT

Quantité de mangues traitées (kg)	
Perte de mangues fraîches (kg)	
Quantité de mangues à livrer (kg)	

4. PRODUCTION

Énergie

Nb de bouteilles de gaz	

Emballages

	Q1	Q2
Nb de sachets		
Nb de cartons		

Gestion des stocks

Les stocks sont constitués d'ensembles de produits (matières premières, produits finis…) qui sont la propriété d'une entreprise.

Ils sont utilisés pour éviter les ruptures de production, pour pallier les aléas de livraison…

Généralement, les sommes investies dans les stocks représentent en moyenne 30 % du chiffre d'affaire. Les valeurs immobilisées sont importantes.

Le stockage génère des difficultés :
– immobilisation des ressources financières ;
– péremption possible des matières premières.

C'est pourquoi il est nécessaire :
– de disposer d'un hall de stockage adéquat à l'activité ;
– d'avoir des outils de gestion de stocks.

Fiche de suivi de stock de matière première (mangues fraîches)

La fiche de suivi du stock de matière première est un document qui permet de suivre les différents mouvements (entrées ou sorties) du stock de mangues fraîches. Cet outil permet au responsable de la production de suivre précisément le stock de matières premières. Tout mouvement dans le magasin de stock doit être enregistré dans cette fiche permettant ainsi d'avoir une situation sur le stock réel. Il est utilisable sous forme de tracé dans un cahier.

Comment remplir cette fiche ?

Date à laquelle il y a eu une entrée ou une sortie de mangues.

N° du lot attribué à la production, qui permet de suivre les produits et d'identifier le producteur (traçabilité).

Entrée en stock (2 sous-colonnes)

- **Nombre de cagettes** : inscrire le nombre de cagettes entrées en stock.
- **Poids** : quantité (en kg) correspondant au nombre de cagettes entrées en stock.

Sortie de stock (2 sous-colonnes)

- **Fruits traités** (colonne divisée en 2 sous-colonnes)
  - **Nombre de cagettes** : traitées au cours de la journée.
  - **Poids** : quantité (en kg) correspondant au nombre de cagettes traitées.
- **Fruits écartés** (colonne divisée en 2 sous-colonnes)
  - **Nombre de cagettes** : éliminées à cette date.
  - **Poids** : quantité (en kg) correspondant au nombre de cagettes éliminées.

Restant en stock (2 sous-colonnes)

- **Nombre de cagettes** : restant en stock.
- **Poids** : quantité (en kg) restant en stock et correspondant au nombre de cagettes restant en stock.

▸▸ *Fiche 2*

SUIVI DE STOCK DE MATIÈRE PREMIÈRE (MANGUES FRAÎCHES)

Date	N° du lot	Entrée en stock		Sortie de stock				Restant en stock	
				Fruits traités		Fruits écartés			
		Nb de cagettes	Poids (kg)	Nb de cagettes	Poids (kg)	Nb de cagettes	Poids (kg)	Nb de cagettes	Poids (kg)

Fiche de suivi du stock de gaz

La fiche de suivi du stock de gaz est un document qui permet de suivre les mouvements des entrées et sorties du stock de gaz.

Comment remplir cette fiche ?

Date à laquelle il y a eu entrées ou sorties de bouteilles de gaz.

Type de bouteille : contenance de la bouteille (en général, 6 ou 12 kg de gaz).

Entrée en stock : nombre de bouteilles entrées en stock.

Sortie de stock : nombre de bouteilles sorties du stock.

Restant en stock : nombre de bouteilles qui restent dans le magasin après chaque mouvement (entrée ou sortie).

▸▸ *Fiche 3*

SUIVI DU STOCK DE GAZ

Date	Type de bouteille (kg)	Entrée en stock	Sortie de stock	Restant en stock

Fiche de suivi des emballages

La fiche de suivi des stocks d'emballages est un document qui permet de suivre les différents mouvements des emballages sous leurs différentes formes (sachets de différentes tailles, cartons...).

Comment remplir cette fiche ?

Date à laquelle on enregistre une entrée ou une sortie de l'article.

Entrée en stock : nombre d'articles concernés, entrés en stock.

Type d'emballages : capacité (g ou kg) et matière de l'emballage.

Sortie de stock (2 sous-colonnes)

- **Utilisé** : nombre d'articles sortis du stock et utilisés.
- **Rebus** : nombre d'articles sortis du stock, en mauvais état et non utilisés.

Restant en stock : nombre d'articles qui restent dans le magasin après chaque mouvement (entrée ou sortie).

▸▸ *Fiche 4*

SUIVI DES STOCKS D'EMBALLAGES

Date	Entrée en stock	Type d'emballage	Sortie de stock		Restant en stock
			Utilisé	Rebus	

Gestion de production

Fiche de suivi de production

La fiche de suivi de la production est un document qui permet de faire ressortir toutes les informations issues des différentes opérations de production.

Comment remplir cette fiche ?

Date à laquelle la mangue fraîche a été traitée.

N° du lot attribué à la production, qui permet de suivre les produits et d'identifier le producteur (traçabilité).

Produit frais (2 sous-colonnes)

- **Nombre de cagettes** traitées**.**
- **Poids** : quantité (en kg) correspondant au nombre de cagettes traitées.

Produit mis en claies (2 sous-colonnes)

- **Nombre de claies** mises dans les séchoirs.
- **Poids de mangues mises en claies**. Quantité (en kg) correspondant au nombre de claies mises dans les séchoirs.

Produit séché (4 sous-colonnes)

- **Poids sec** : quantité (en kg) totale de produit séché.
- **Poids Q1** : quantité (en kg) de produit séché de 1er choix (Q1).
- **Poids Q2** : quantité (en kg) de produit séché de 2e choix (Q2).
- **Ratio Q1** : rapport (à exprimer en %) entre la quantité de produit séché de qualité 1 et la quantité totale de produit séché (multiplier le rapport par 100 pour avoir une valeur en pourcentage).

Gaz - Nombre de bouteilles changées au cours de la production.

▸▸ *Fiche 5*

SUIVI DE LA PRODUCTION

Date	N° du lot	Produit frais		Produit mis sur claies		Produit séché					Gaz Nb de bouteilles changées
		Nb de cagettes traitées	Poids de produit traité (kg)	Nb de claies	Poids de produit à sécher (kg)	Poids de produit sec (kg)	Poids de produit sec de qualité Q1 (kg)	Poids de produit sec de qualité Q2 (kg)	Ration Q1 (%)		

Bilan de campagne

Fiche de synthèse de production

La fiche de synthèse de production permet au responsable de l'unité d'établir son bilan de campagne, sous réserve que les fiches de gestion des stocks et de la production aient bien été complétées.

Comment remplir cette fiche ?

Nombre de jours de production durant la campagne.

Approvisionnement

Quantité de mangues livrées : somme des quantités (en kg) de la colonne « Entrée en stock » des fiches de suivi des stocks de matière première.

Quantité de mangues traitées : somme des quantités (en kg) de la colonne « Fruits traités » des fiches de suivi des stocks de matière première.

Pertes de mangues fraîches : somme des quantités (en kg) de la colonne « Fruits écartés » des fiches de suivi des stocks de matière première.

Production

Poids produit sec : somme des quantités de poids de produit sec (en kg) des fiches de suivi de la production.

Poids produit Q1 : somme des quantités de poids Q1 (en kg) des fiches de suivi de la production.

Poids produit Q2 : somme des quantités de poids Q2 (en kg) des fiches de suivi de la production.

Nombre de bouteilles de gaz « consommées » au cours de la campagne.

Nombre de sachets utilisés pendant toute la campagne (mettre autant de colonnes que de types de sachets différents).

Nombre de cartons utilisés pendant toute la campagne (mettre autant de colonnes que de types de cartons différents).

Commercialisation

kg livrés : quantités (en kg) de mangues de qualité Q1 et Q2 livrées au client.

kg acceptés : quantités (en kg) de mangues de qualité Q1 et Q2 acceptées par le client.

kg refusés : quantités (en kg) de mangues de qualité Q1 et Q2 refusées par le client.

Reste en stock : quantités (en kg) de mangues de qualité Q1 et Q2 restant en stock.

▸▸ *Fiche 6*

SYNTHÈSE DE LA PRODUCTION

ANNÉE CAMPAGNE : ....

1. NOMBRE DE JOURS DE PRODUCTION ☐

2. APPROVISIONNEMENT

Quantité de mangues livrées (kg) ☐

Quantité de mangues traitées (kg) ☐

Perte de mangues fraîches (kg) ☐

3. PRODUCTION

Produits finis

Poids de produit séché (kg) ☐

Poids de produit de qualité Q1 (kg) ☐

Poids de produit de qualité Q2 (kg) ☐

Énergie

Nb de bouteilles de gaz consommées ☐

Emballages

	Q1	Q2
Nb de sachets		
Nb de cartons		

4. COMMERCIALISATION

kg livrés ☐

kg acceptés ☐

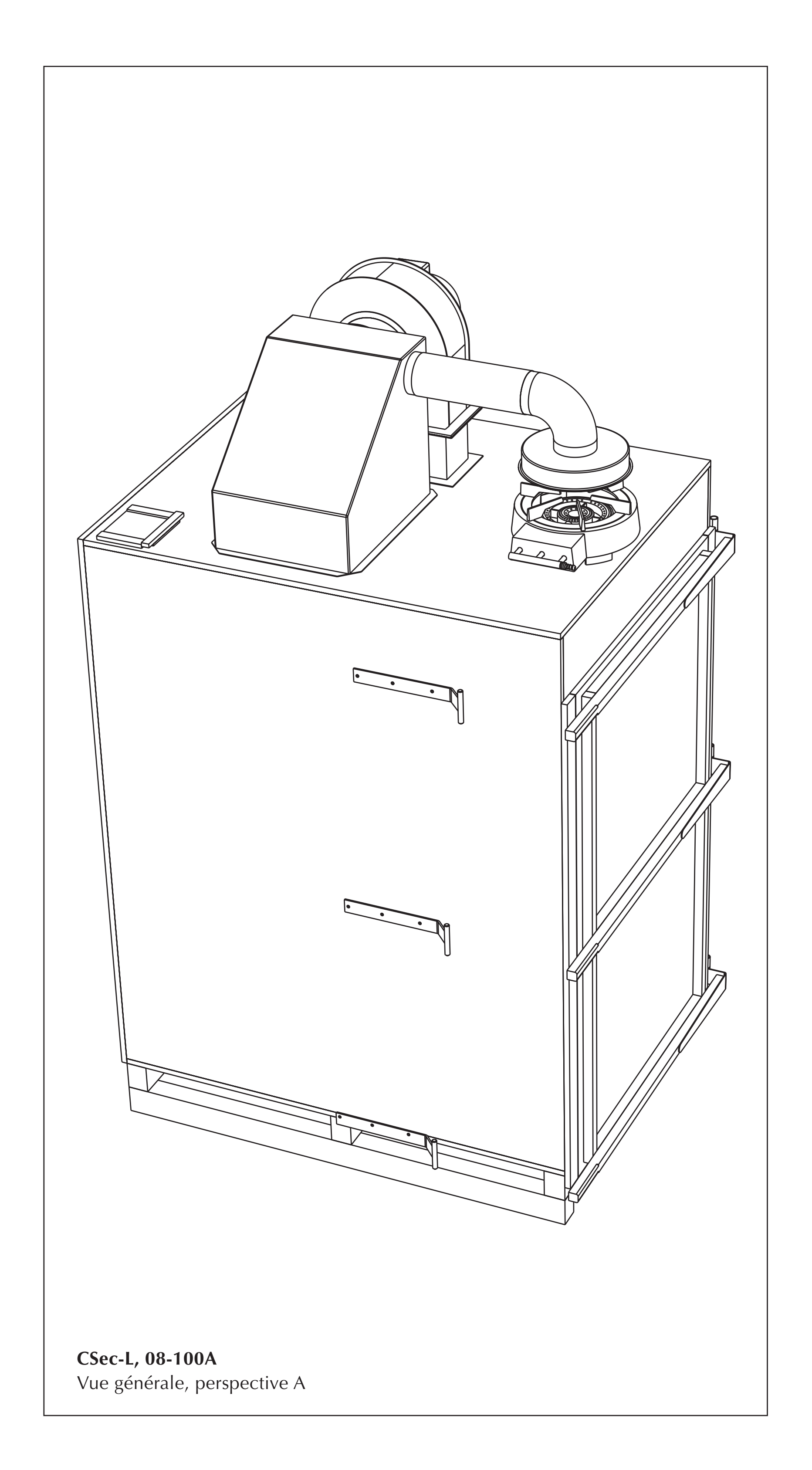
kg refusés ☐

5. RESTE EN STOCK

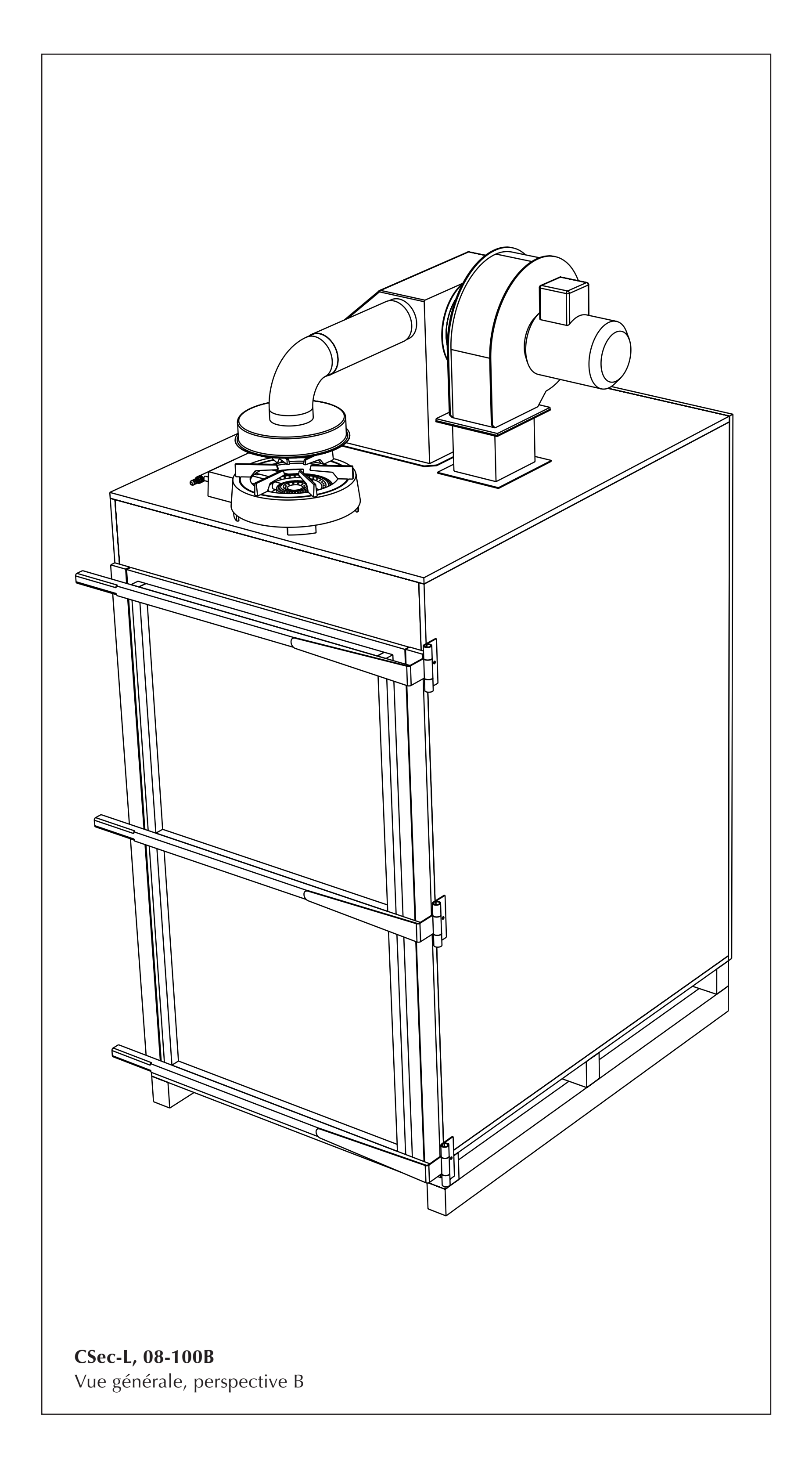
	Q1	Q2
kg		

ANNEXE

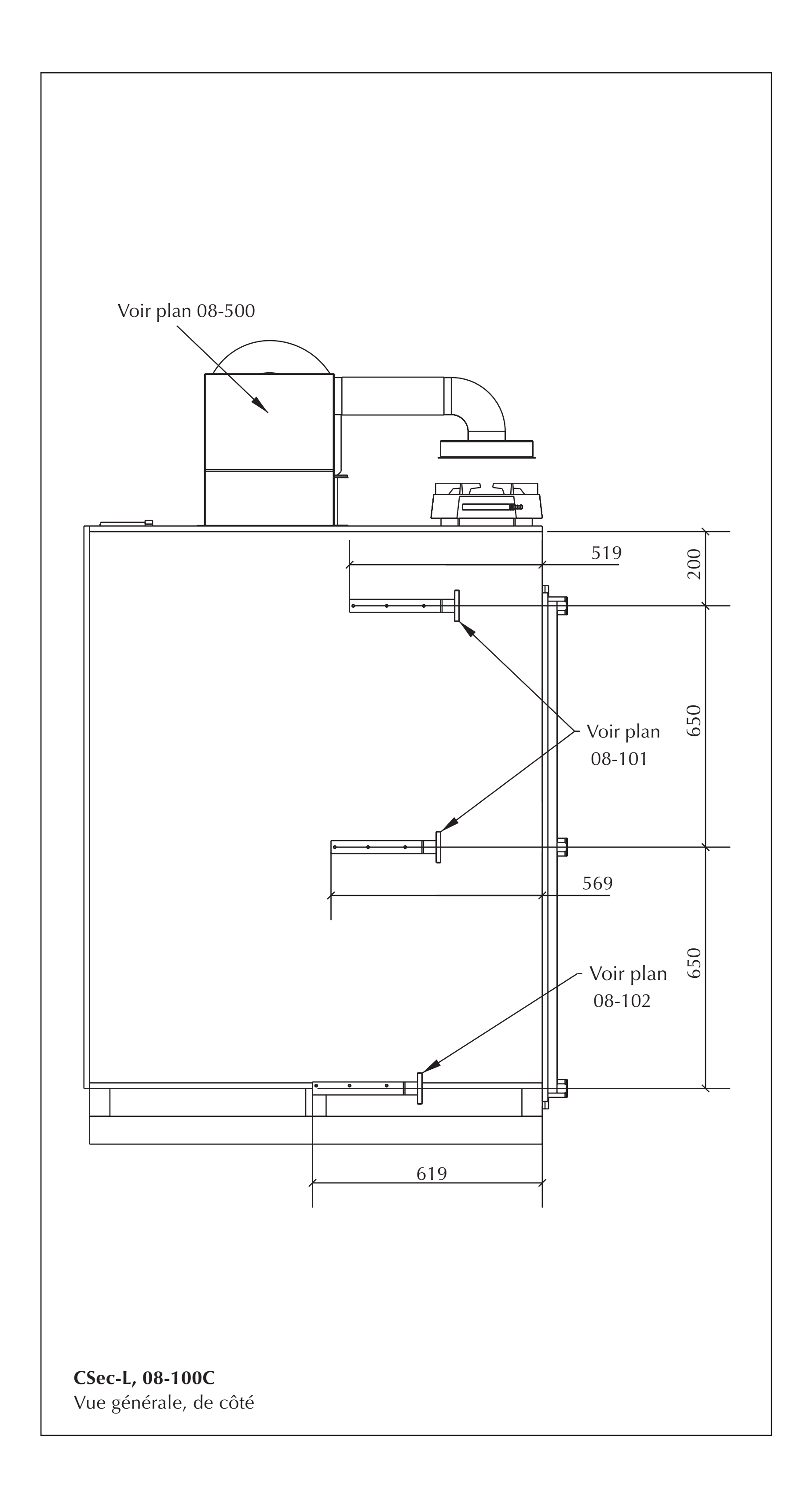
Plans du séchoir ventilé



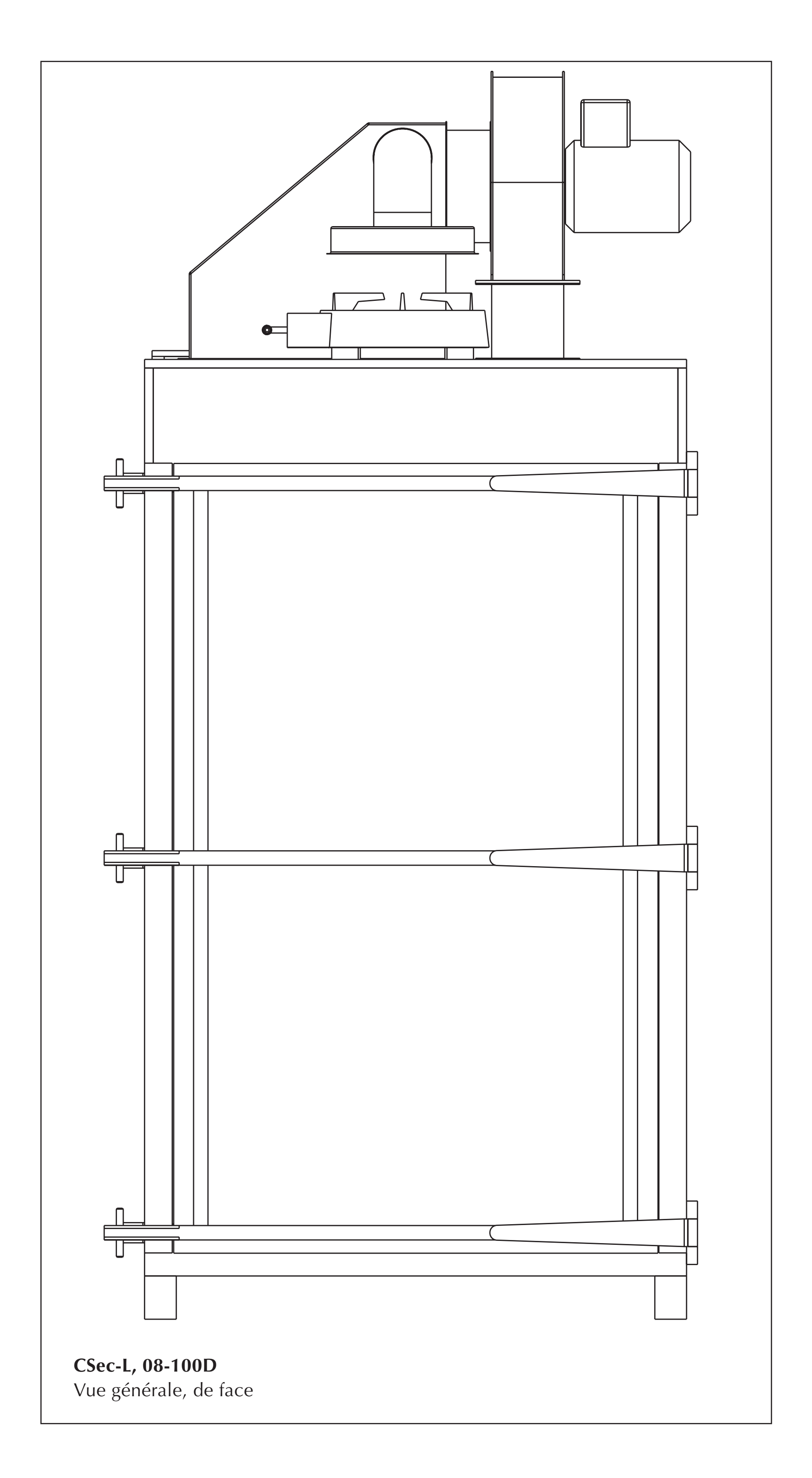
CSec-L, 08-100A
Vue générale, perspective A



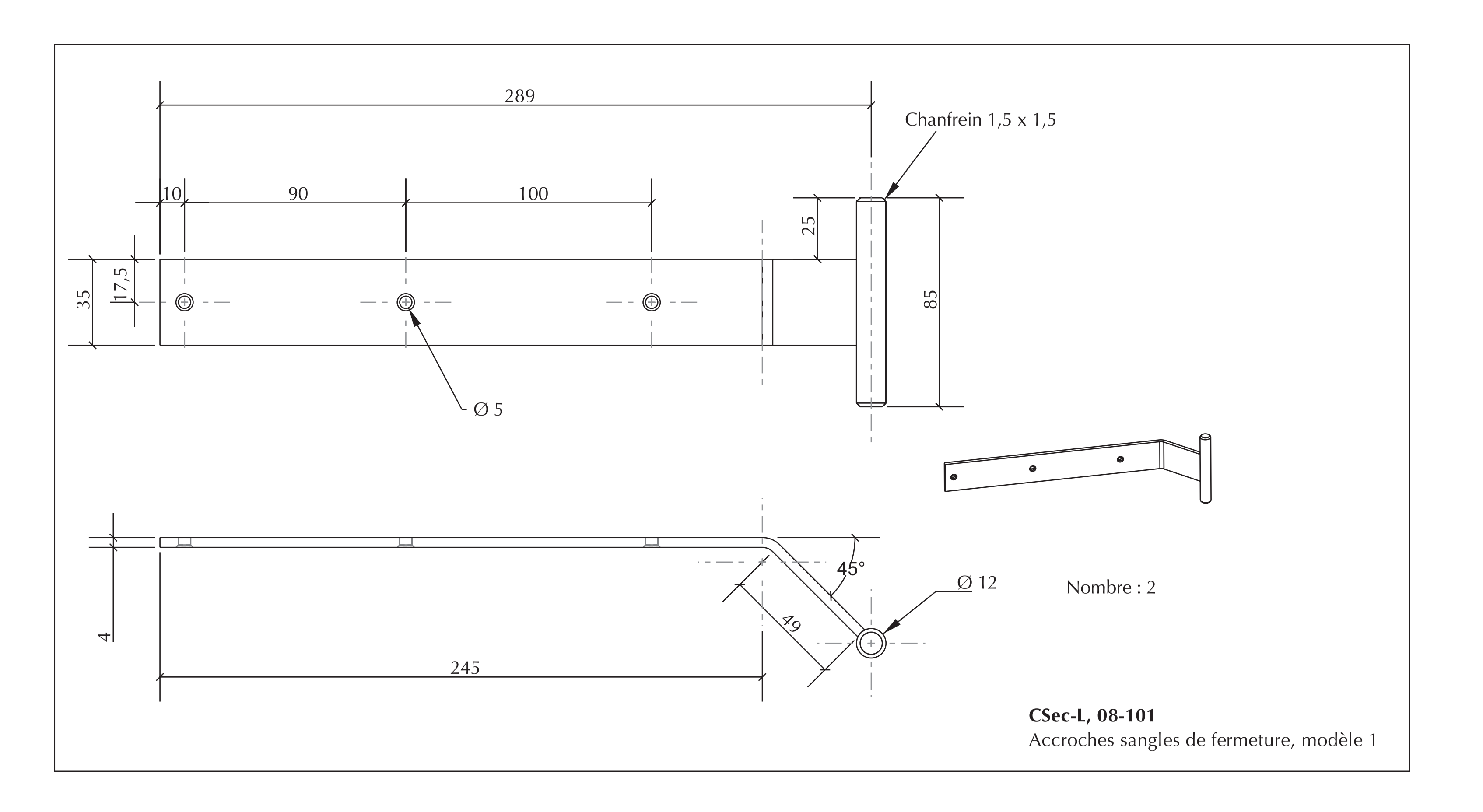
CSec-L, 08-100B
Vue générale, perspective B

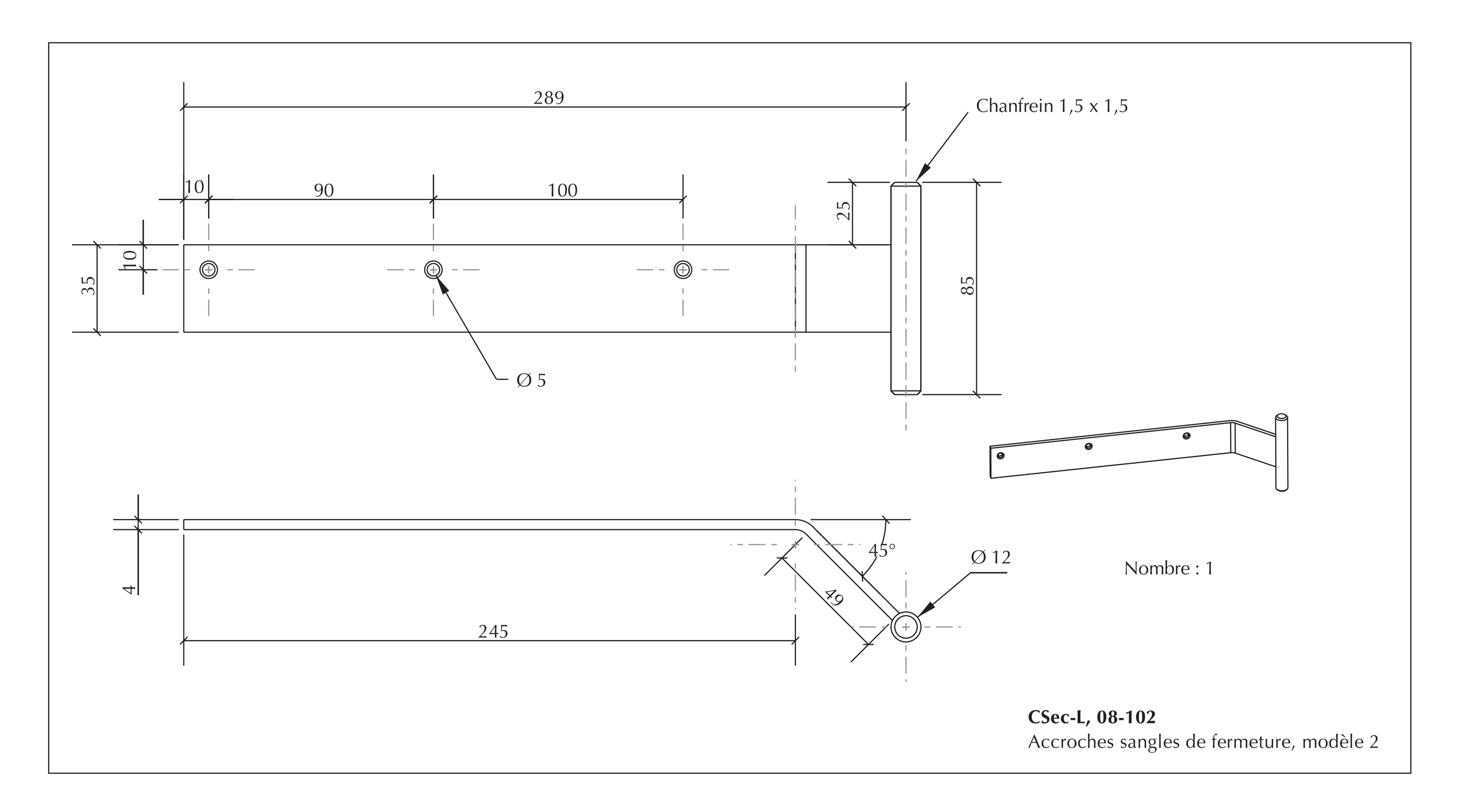


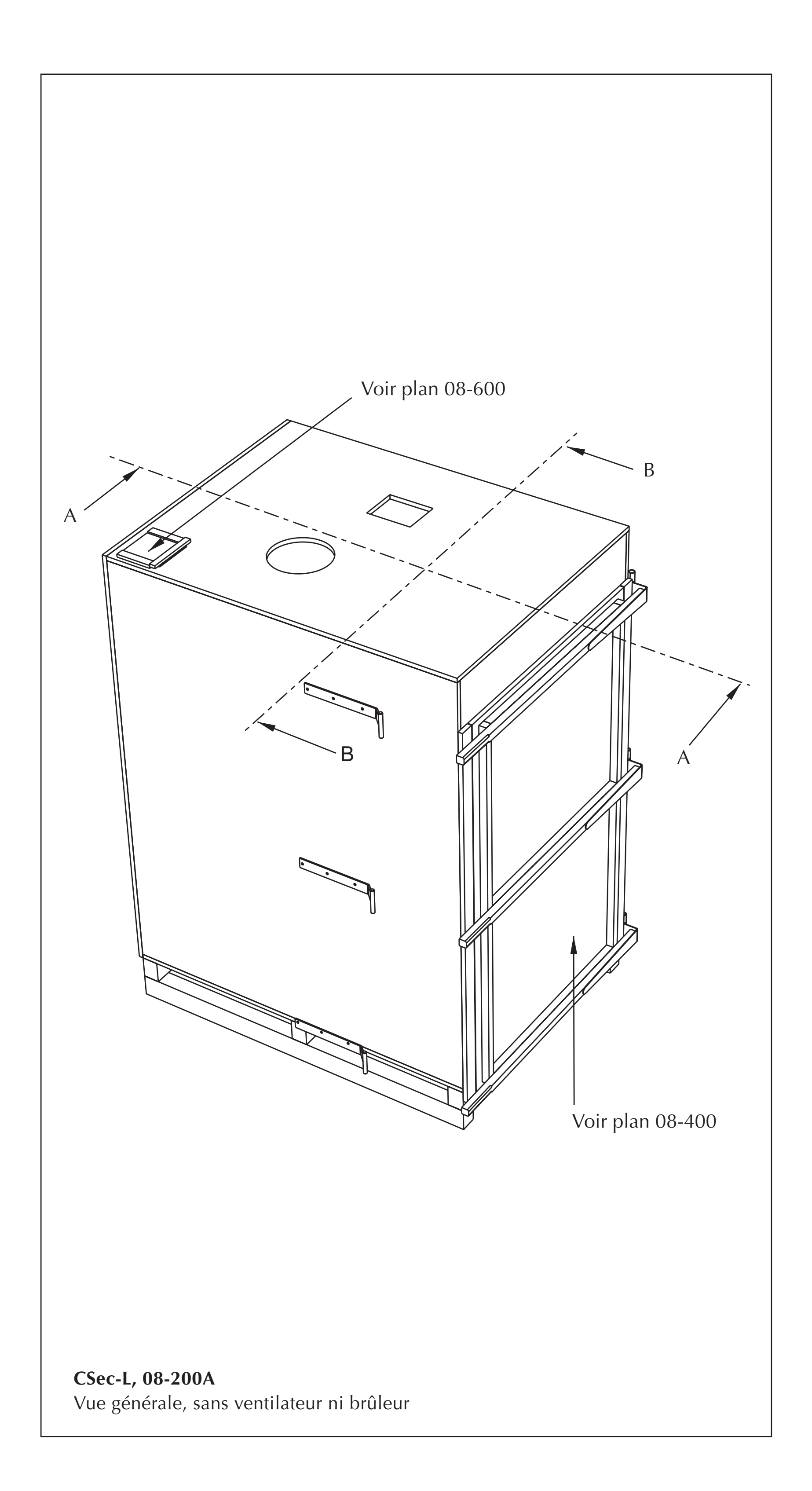
CSec-L, 08-100C
Vue générale, de côté



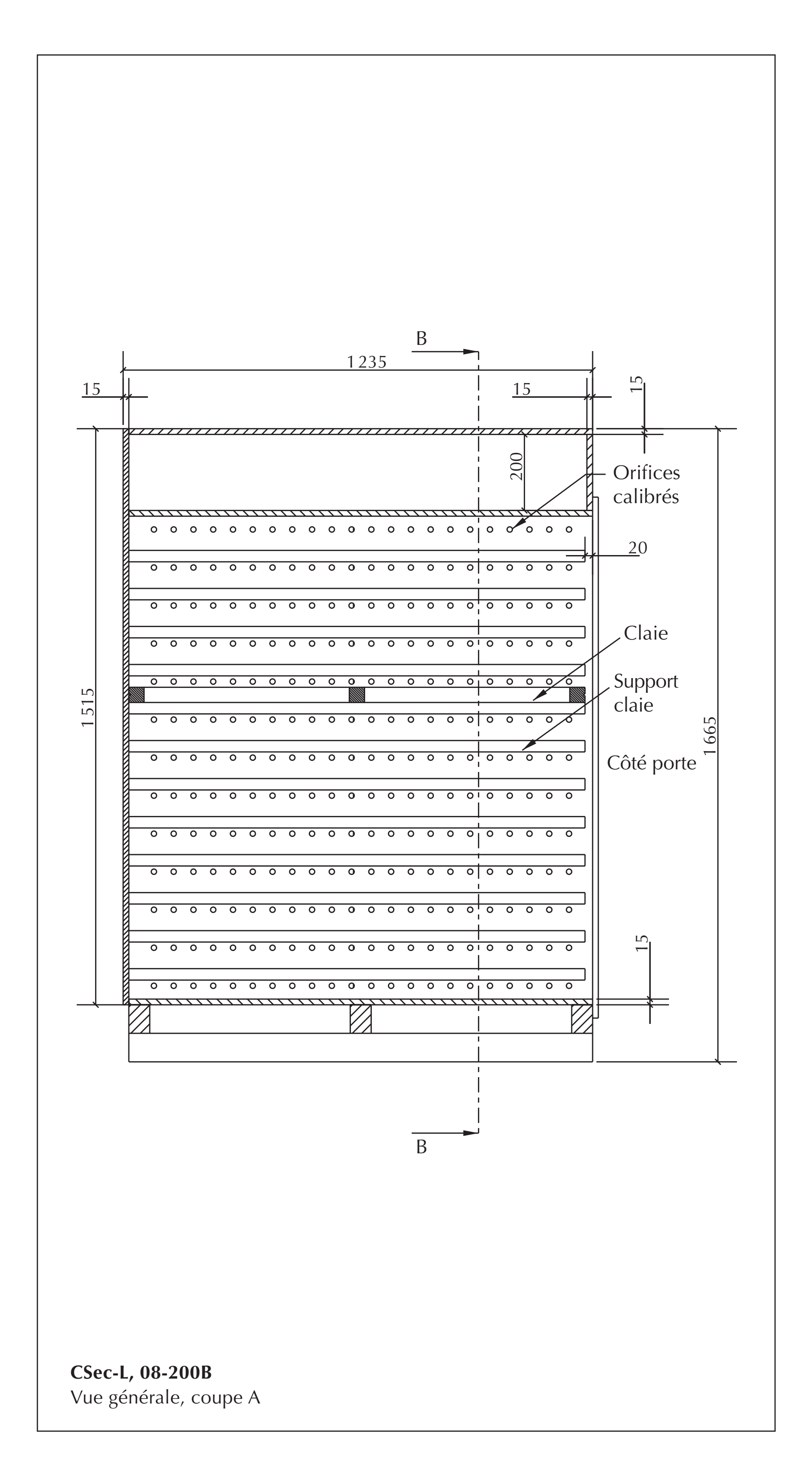
CSec-L, 08-100D
Vue générale, de face


289
Chanfrein 1,5 x 1,5
10
90
100
25
35
17,5
85
Ø 5
45°
Ø 12
Nombre : 2
49
4
245
CSec-L, 08-101
Accroches sangles de fermeture, modèle 1

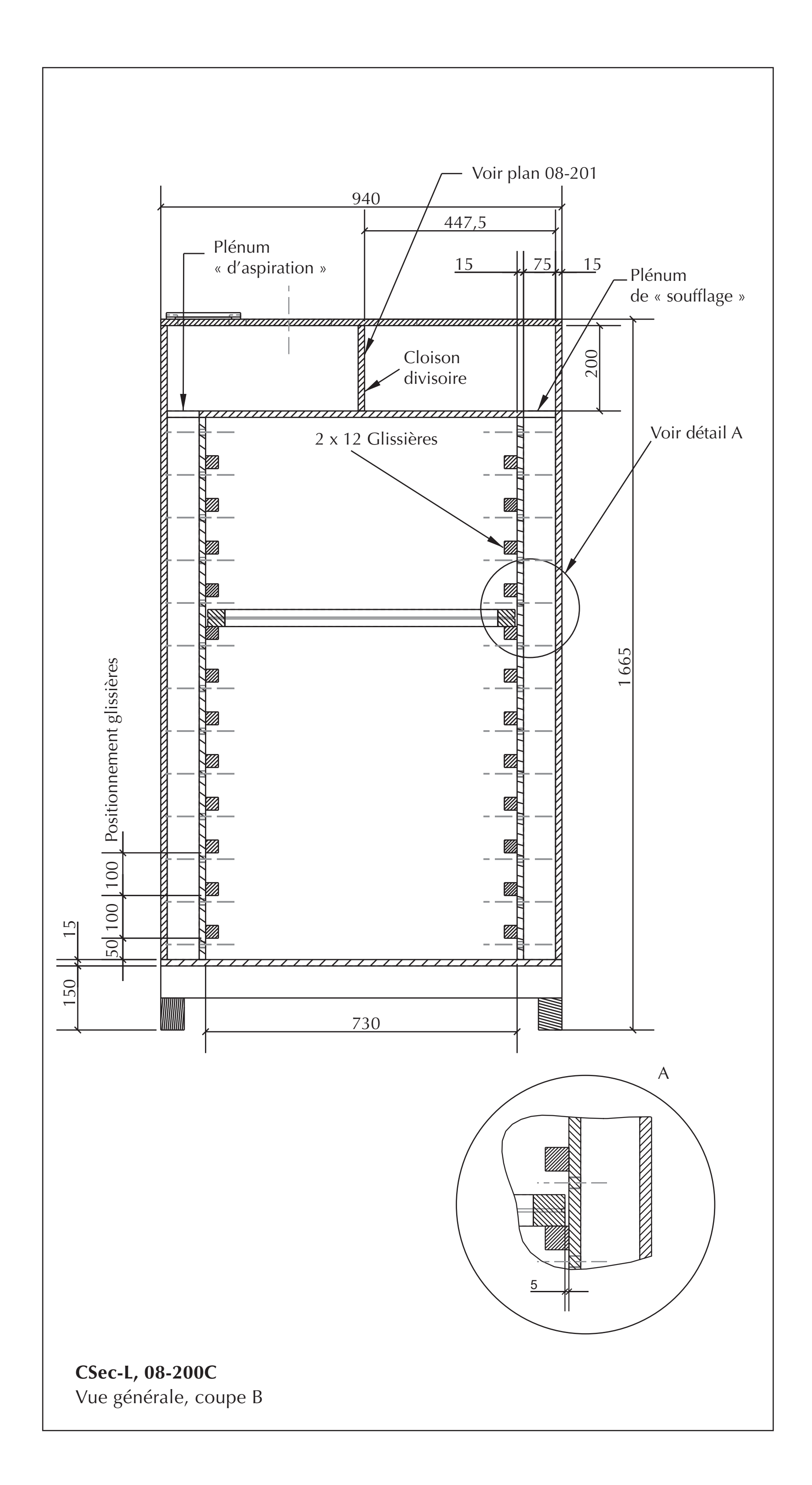

289
Chanfrein 1,5 x 1,5
10
90
100
25
10
35
85
Ø 5
45°
Ø 12
Nombre : 1
49
4
245
CSec-L, 08-102
Accroches sangles de fermeture, modèle 2



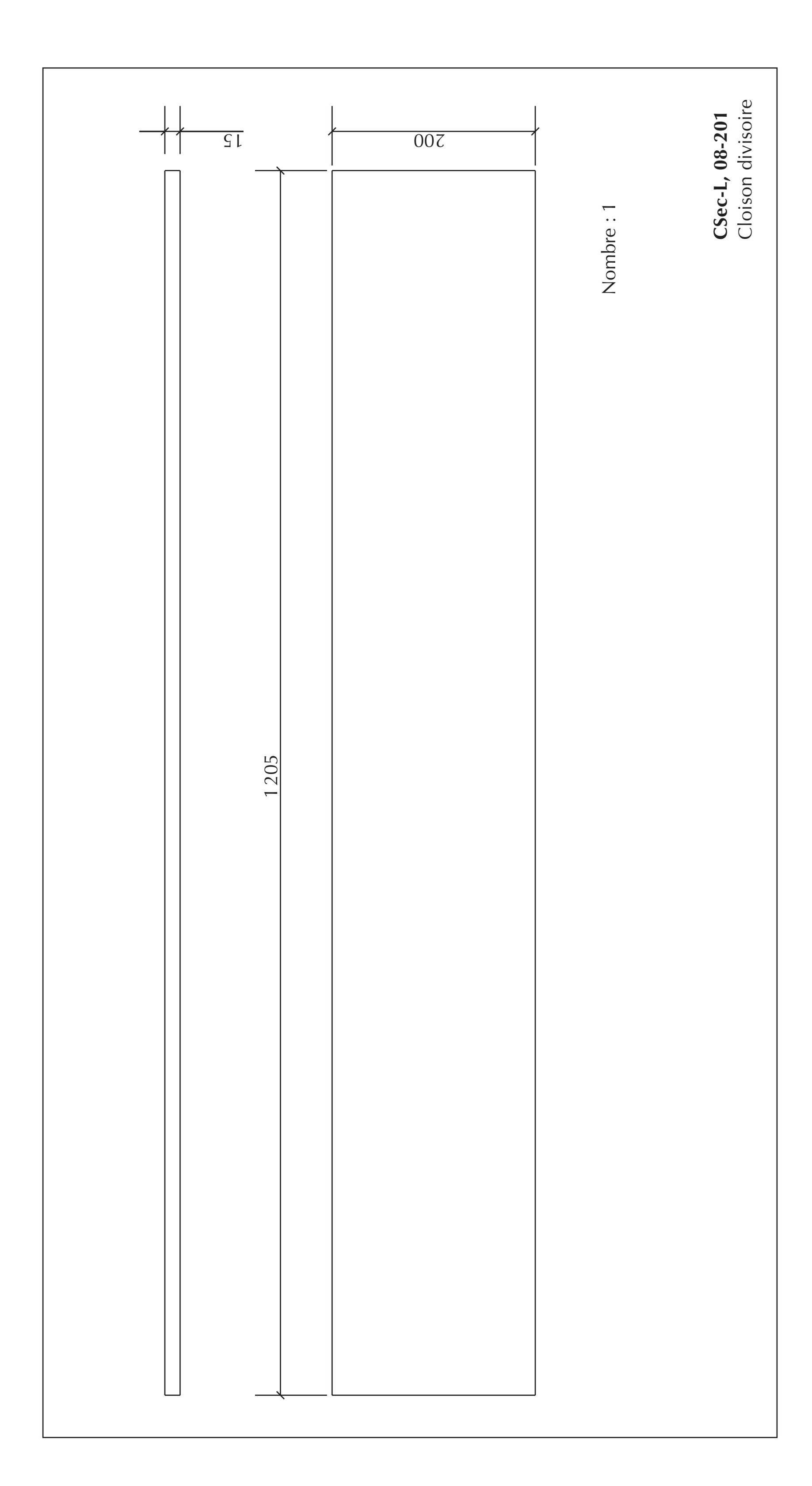
CSec-L, 08-200A
Vue générale, sans ventilateur ni brûleur

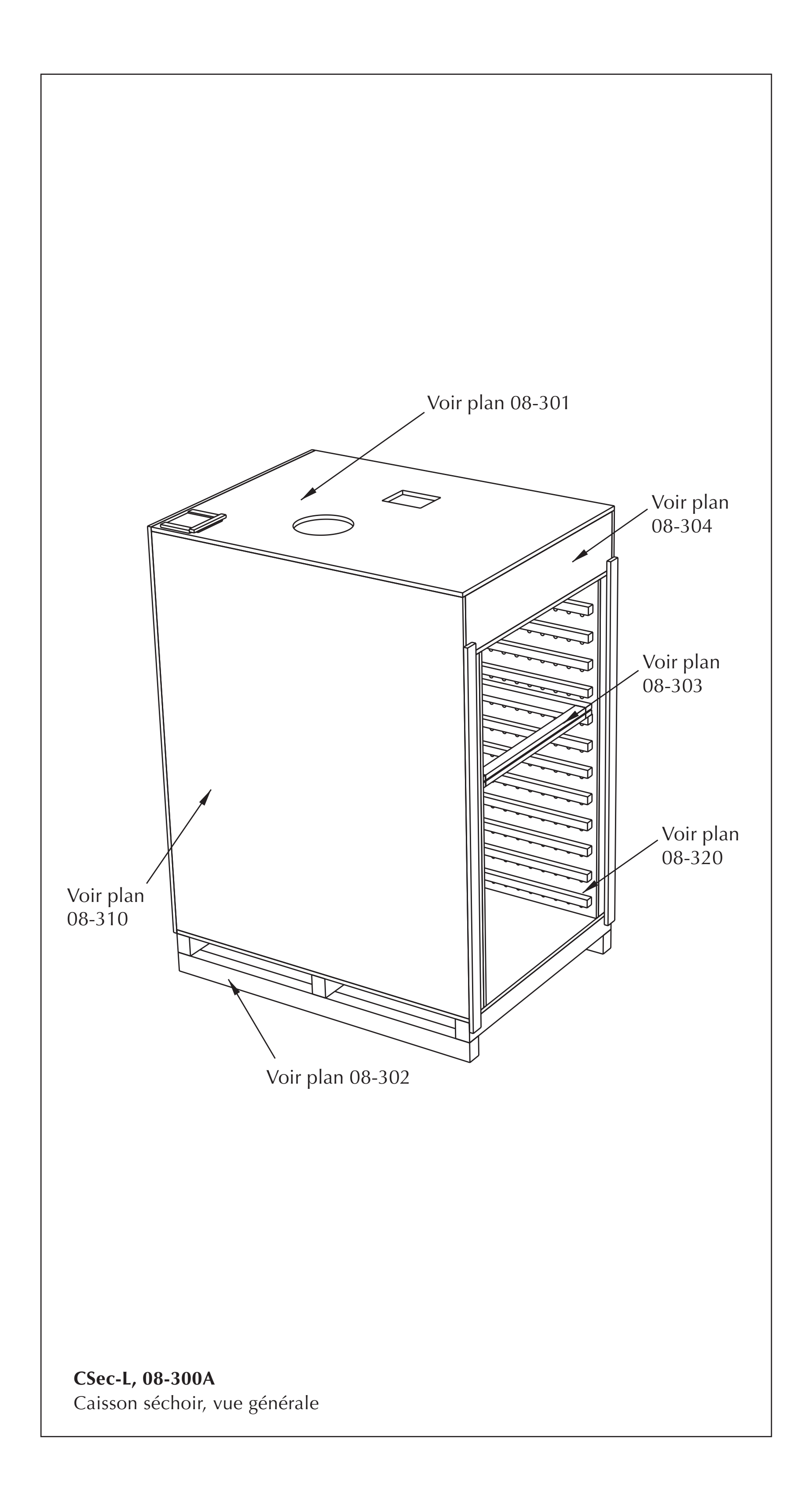


CSec-L, 08-200B
Vue générale, coupe A

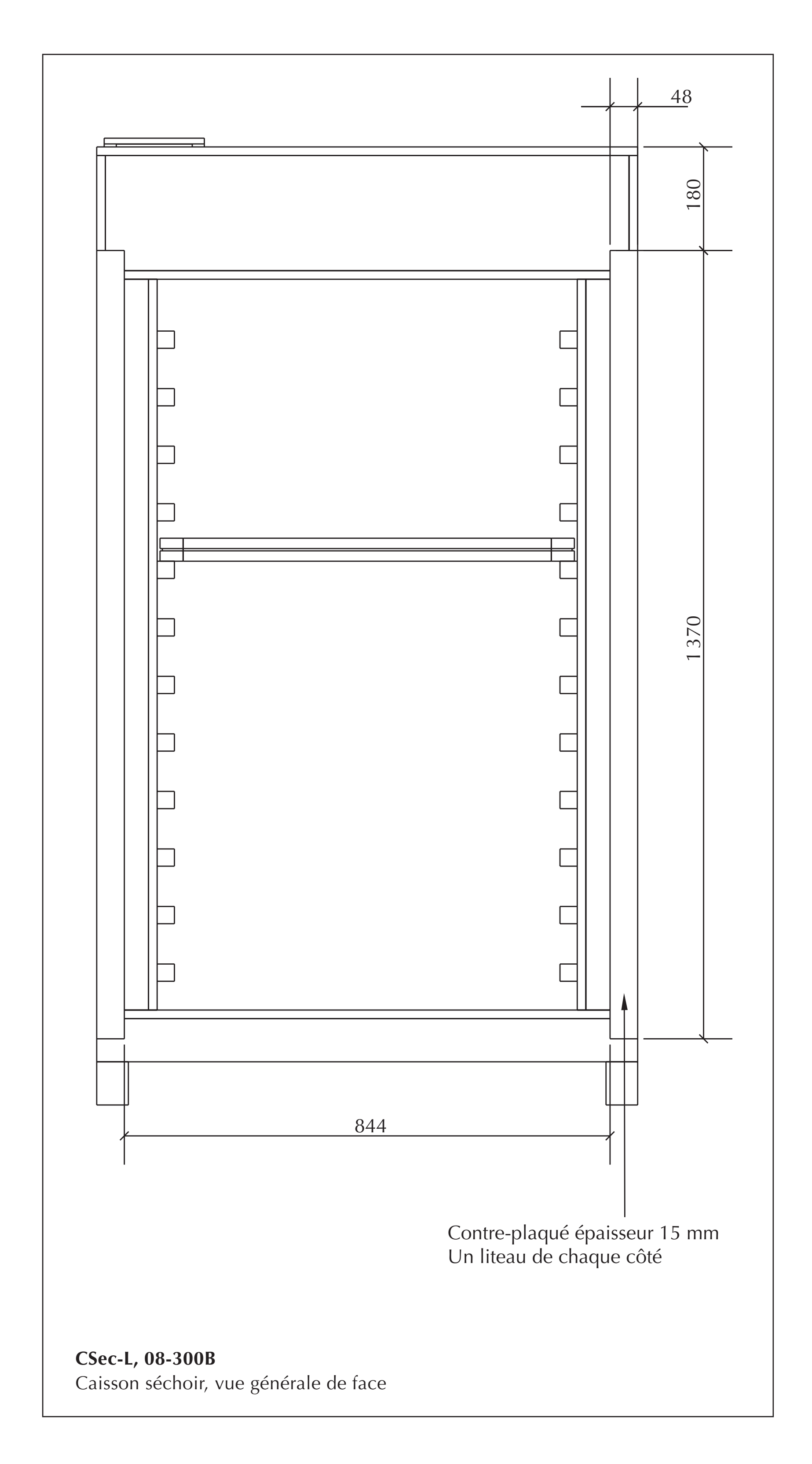


CSec-L, 08-200C
Vue générale, coupe B

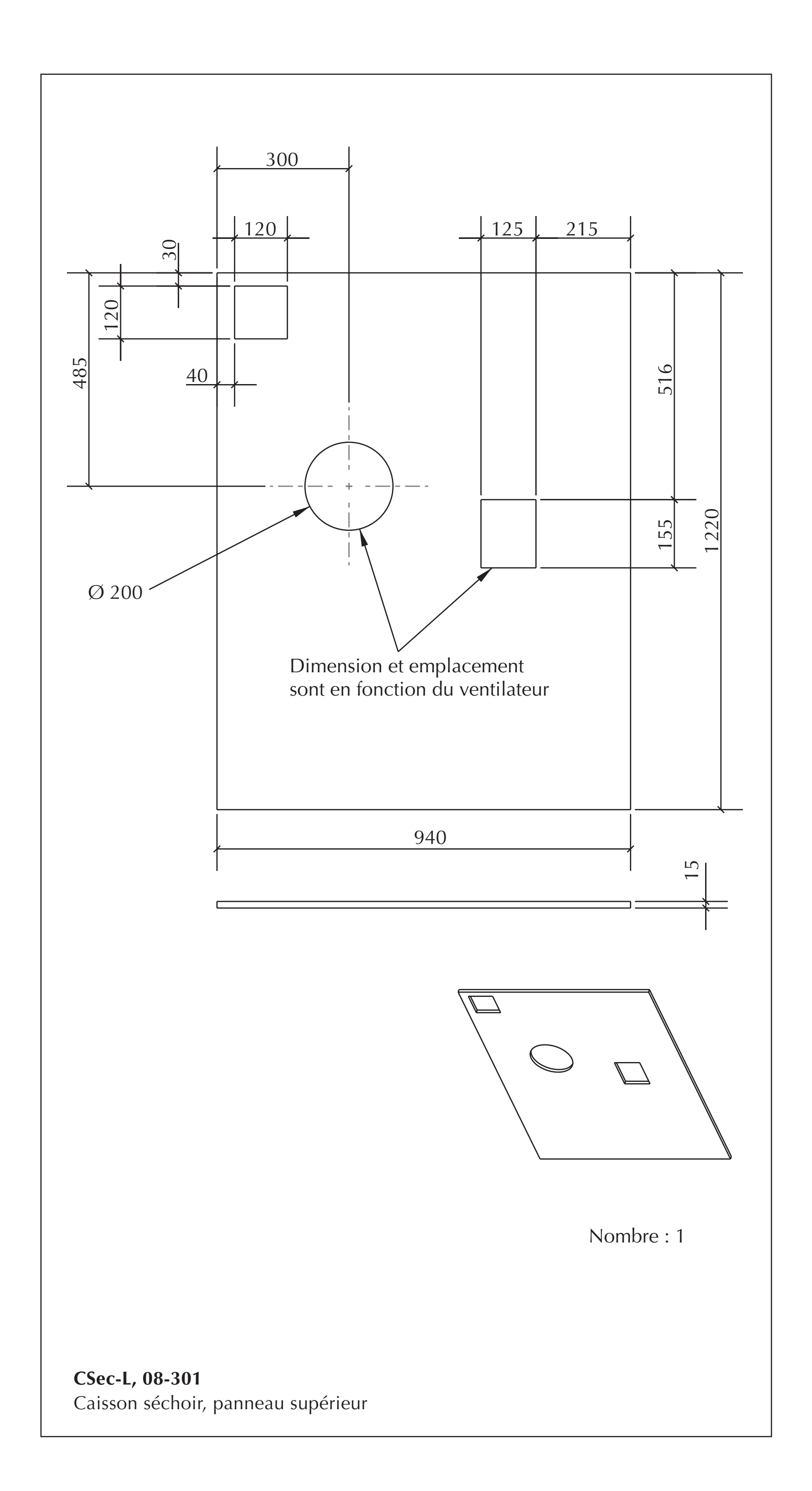

CSec-L, 08-201
Cloison divisoire
Nombre : 1
200
15
1 205



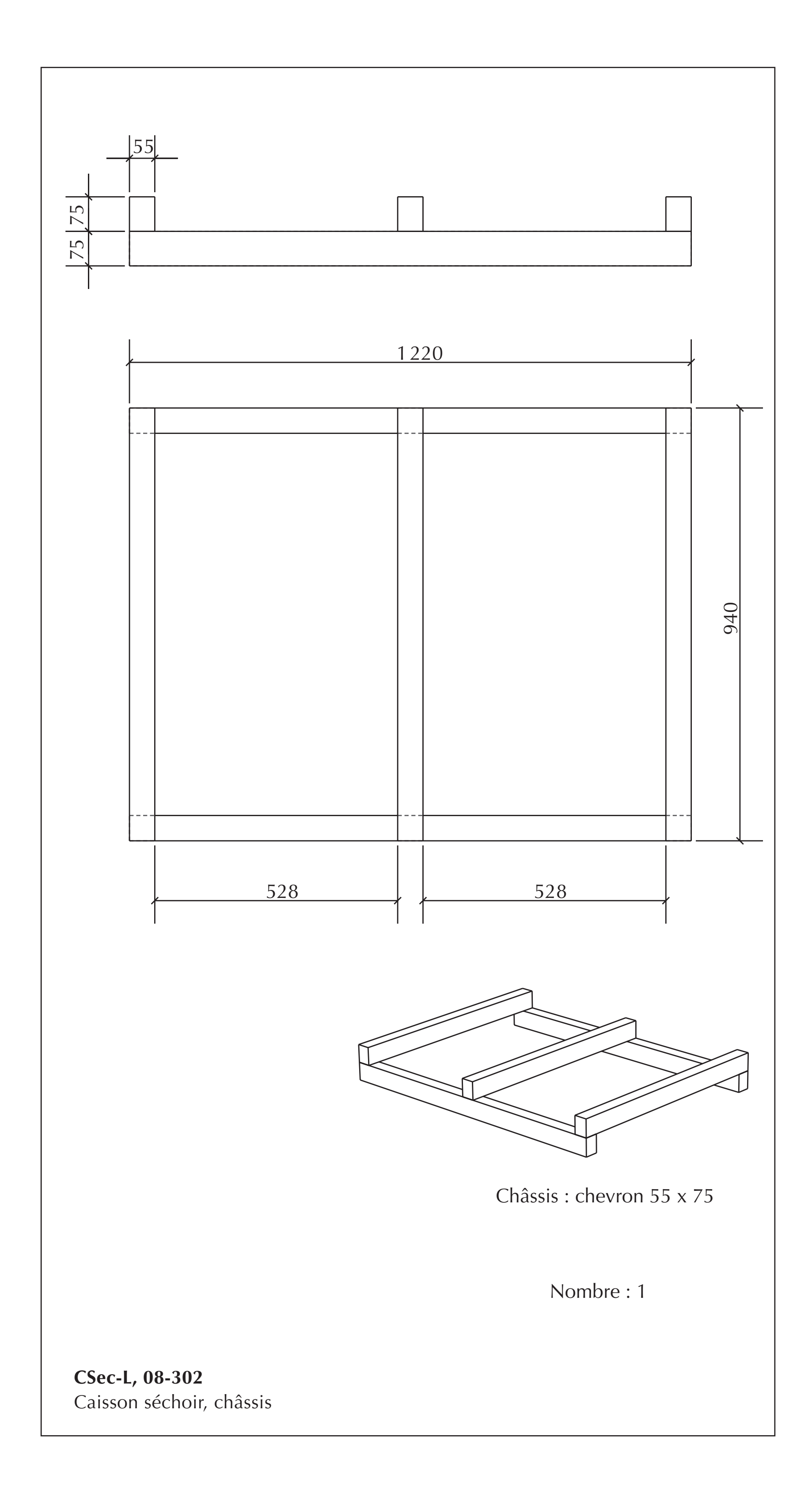
CSec-L, 08-300A
Caisson séchoir, vue générale

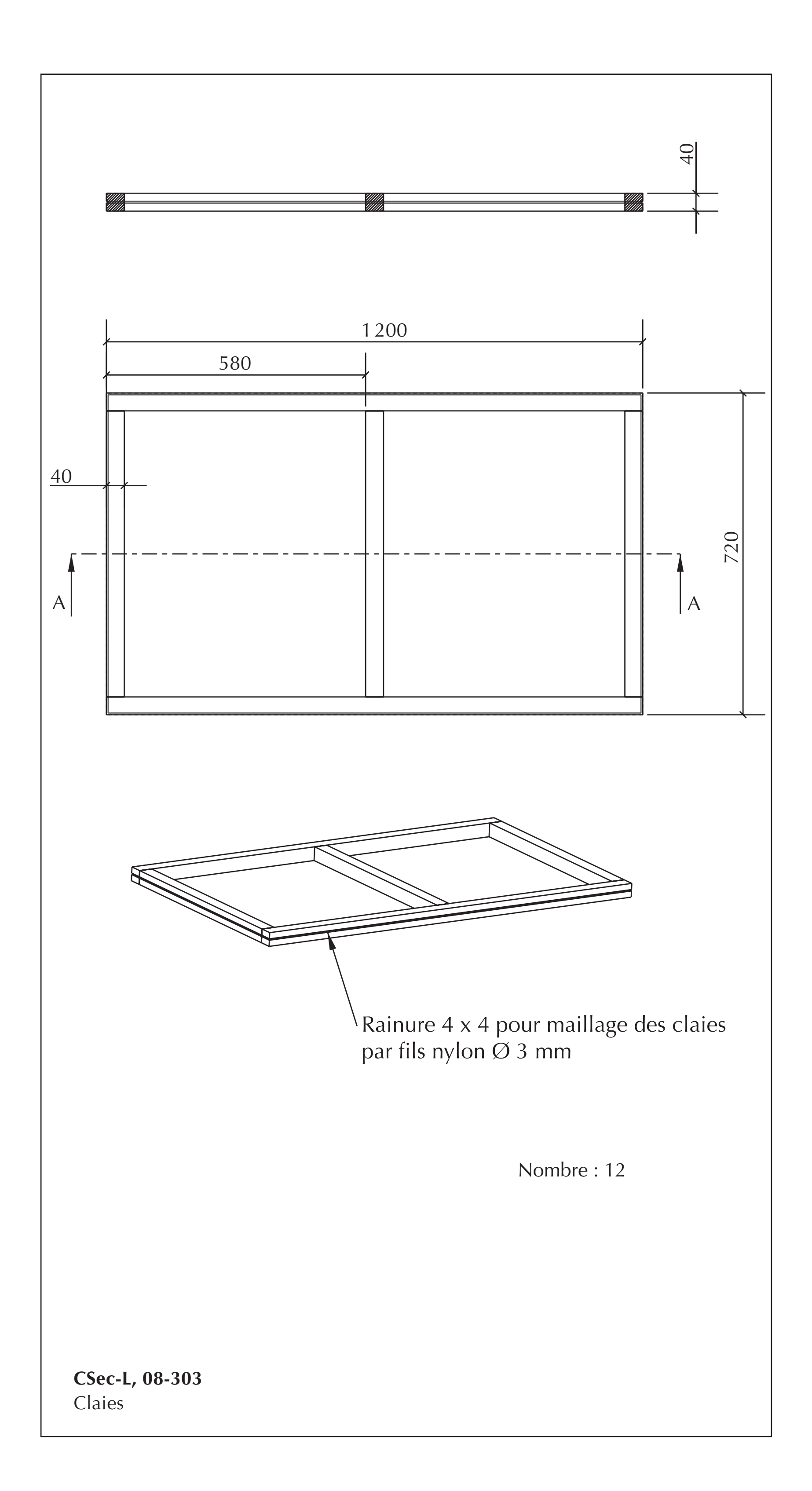


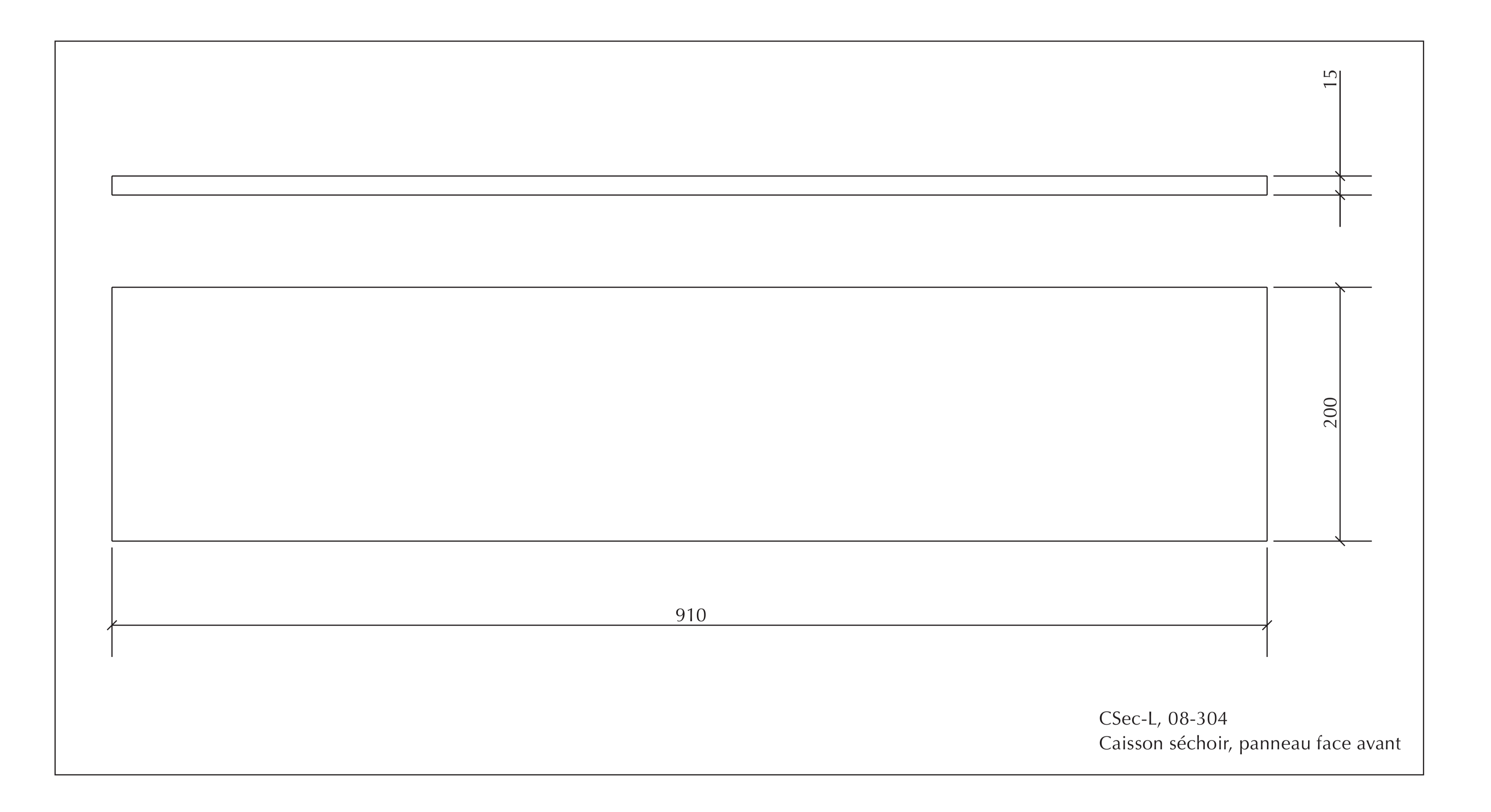
CSec-L, 08-300B
Caisson séchoir, vue générale de face

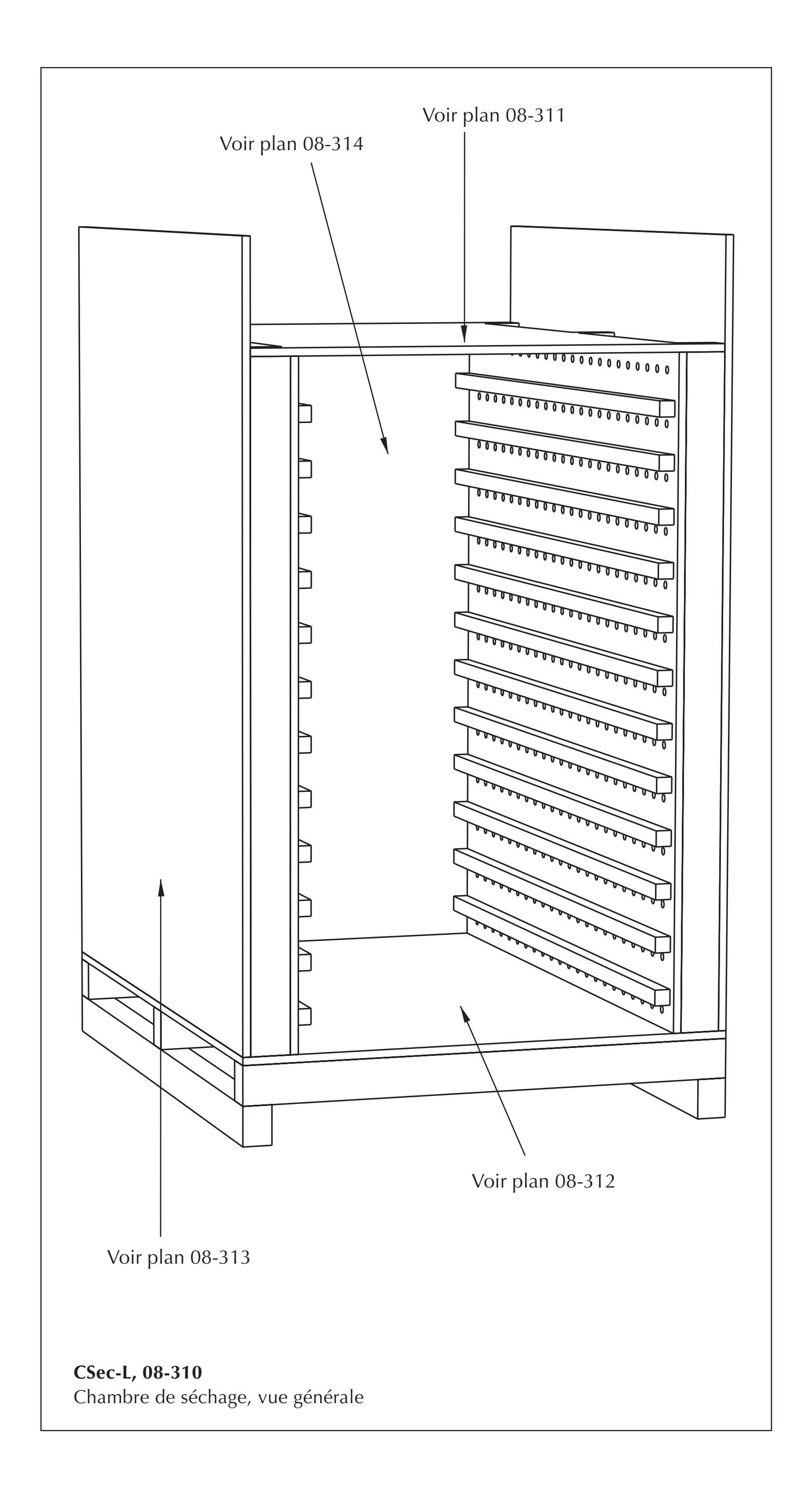


CSec-L, 08-301
Caisson séchoir, panneau supérieur

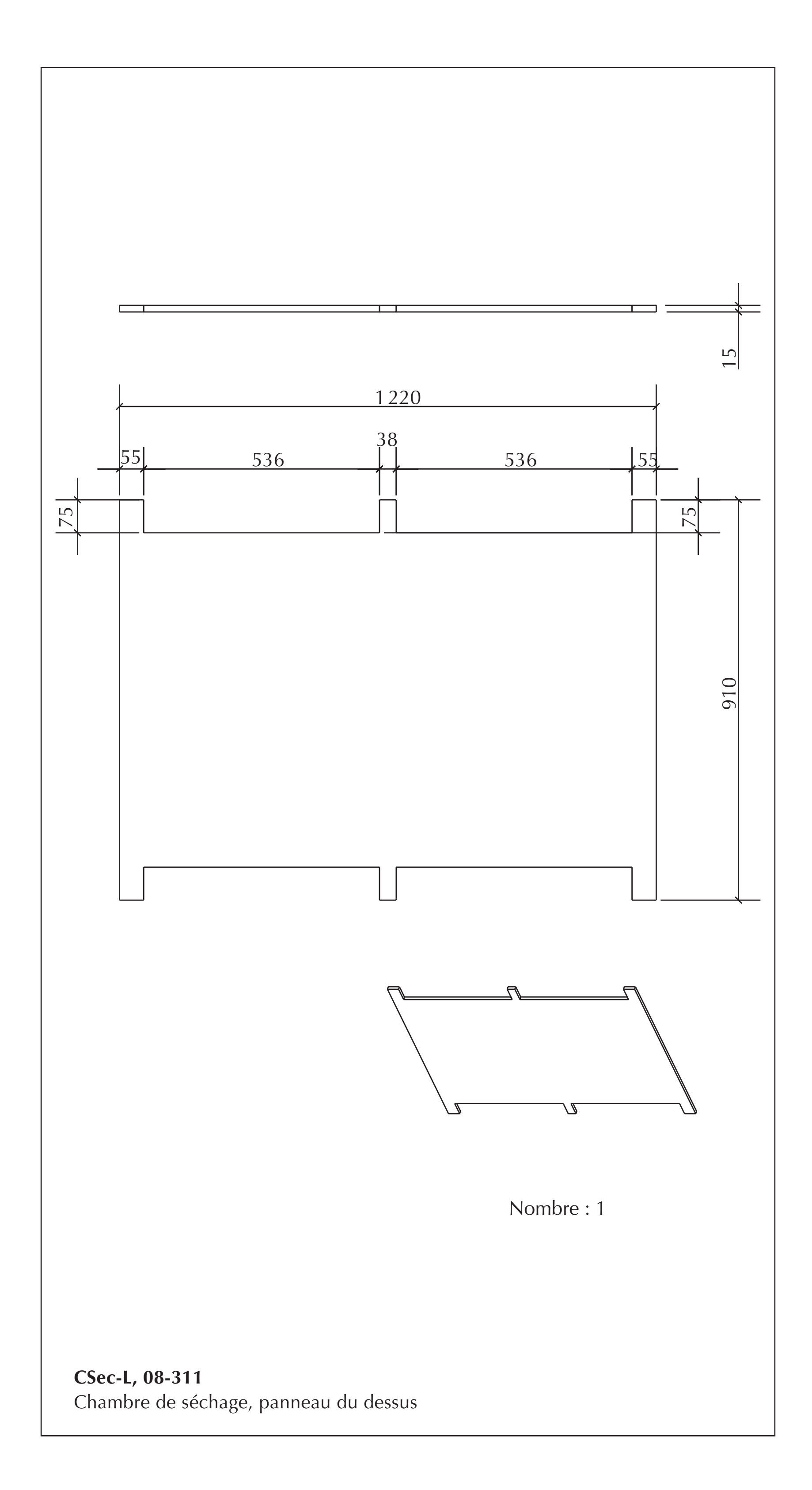

55
75
75
1 220
940
528
528
Châssis : chevron 55 x 75
Nombre : 1
CSec-L, 08-302
Caisson séchoir, châssis


40
1200
580
40
720
A
A
Rainure 4 x 4 pour maillage des claies
par fils nylon Ø 3 mm
Nombre : 12
CSec-L, 08-303
Claies

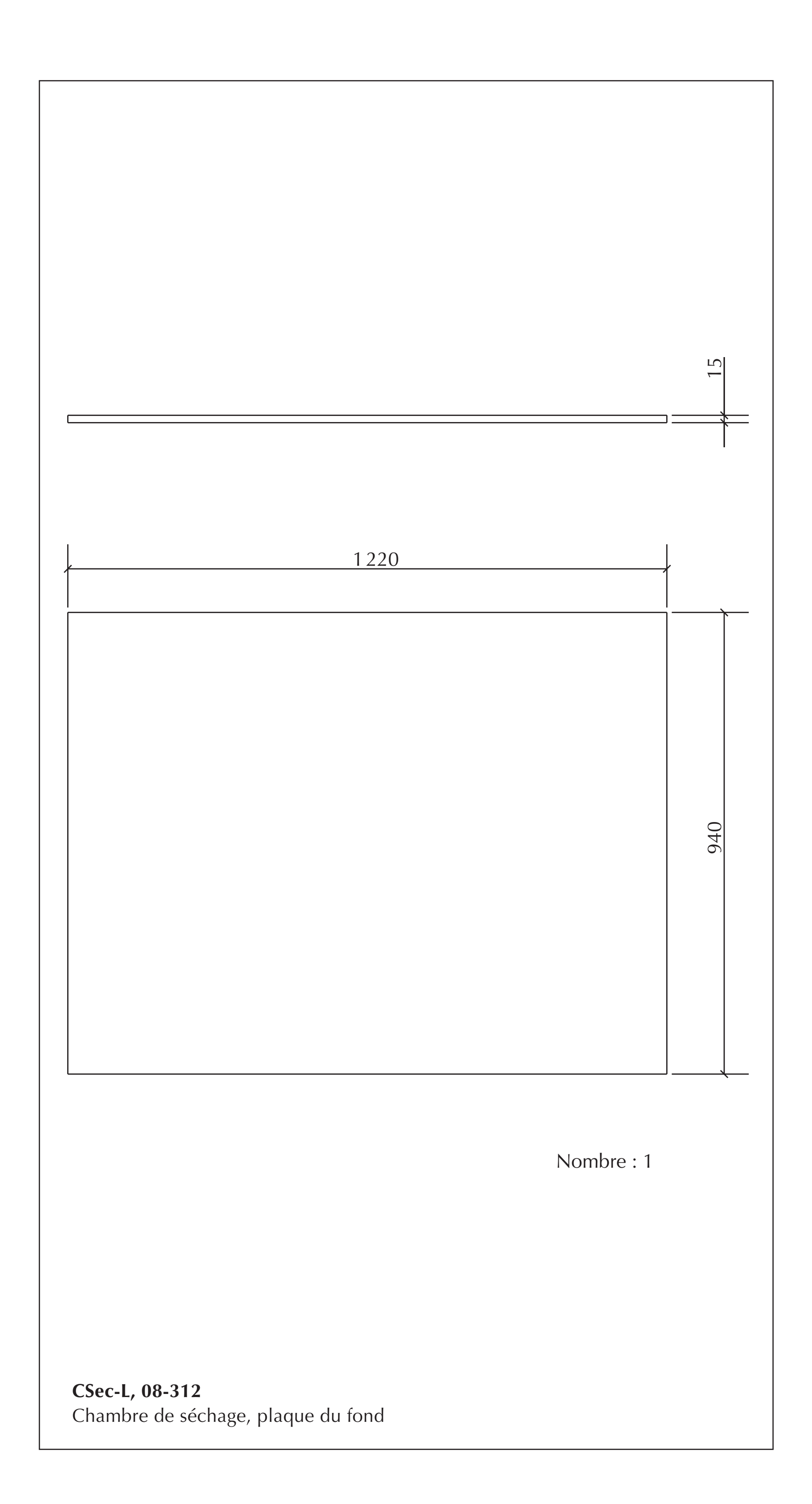

15
200
910
CSec-L, 08-304
Caisson séchoir, panneau face avant



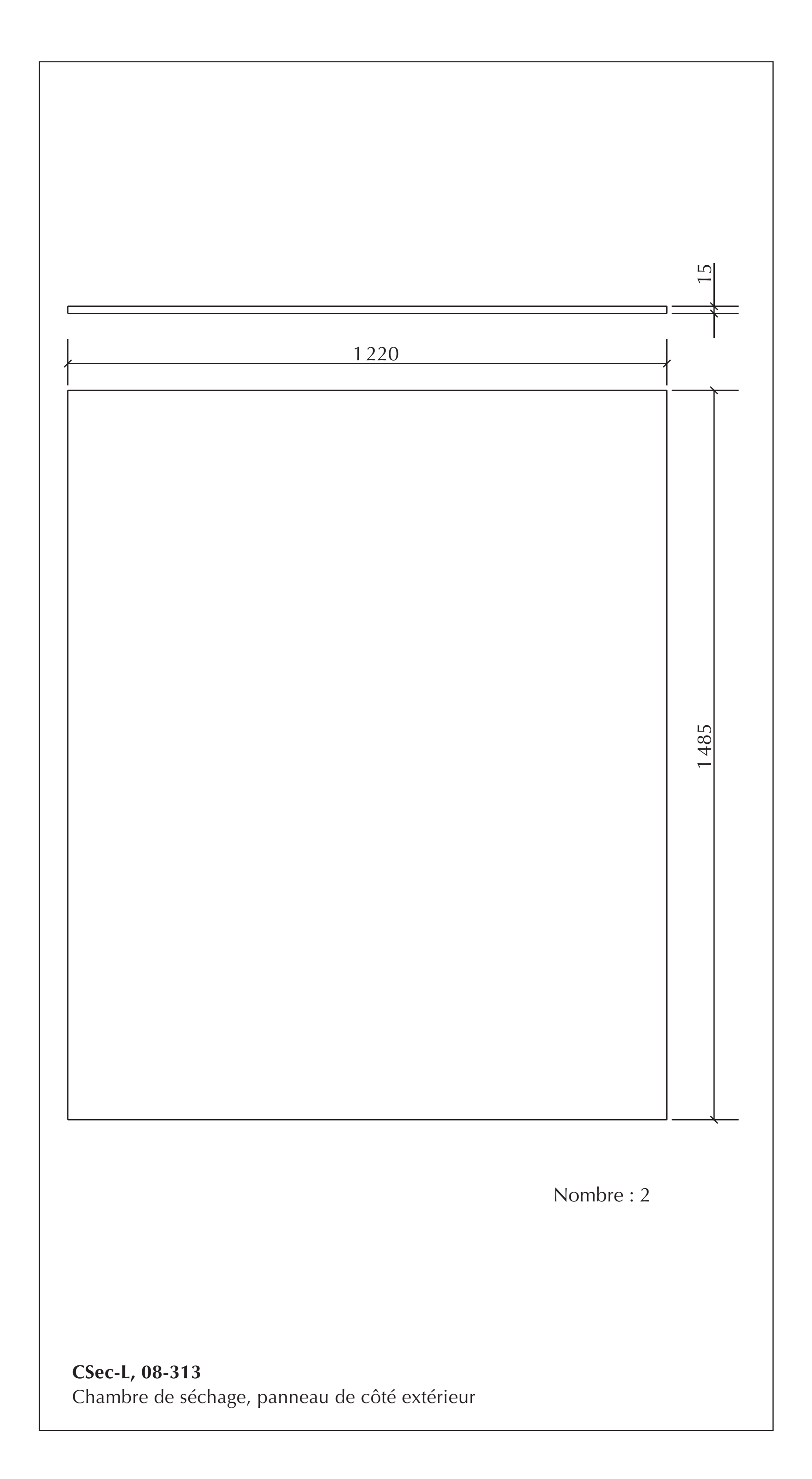
CSec-L, 08-310
Chambre de séchage, vue générale



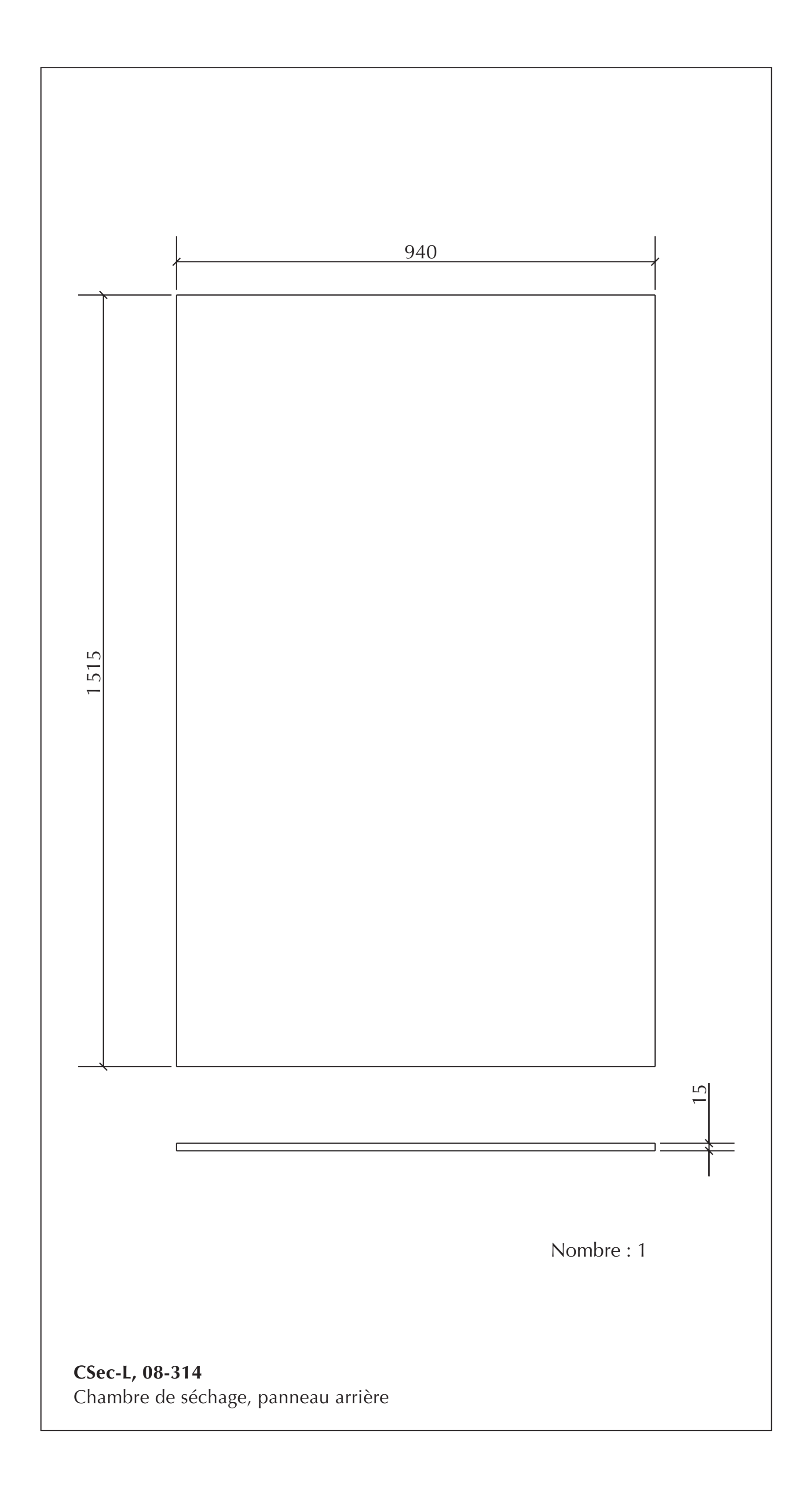
CSec-L, 08-311
Chambre de séchage, panneau du dessus



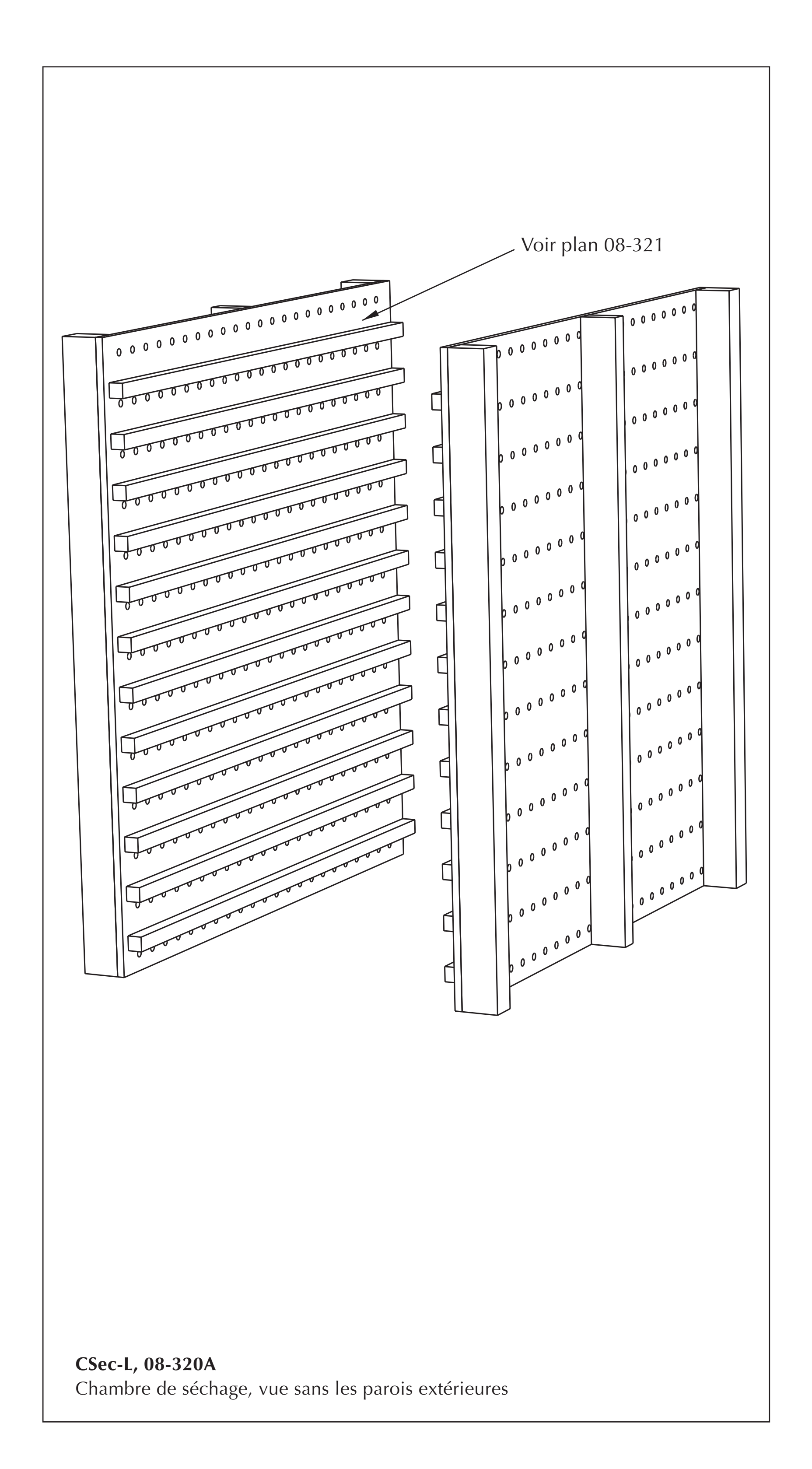
CSec-L, 08-312
Chambre de séchage, plaque du fond



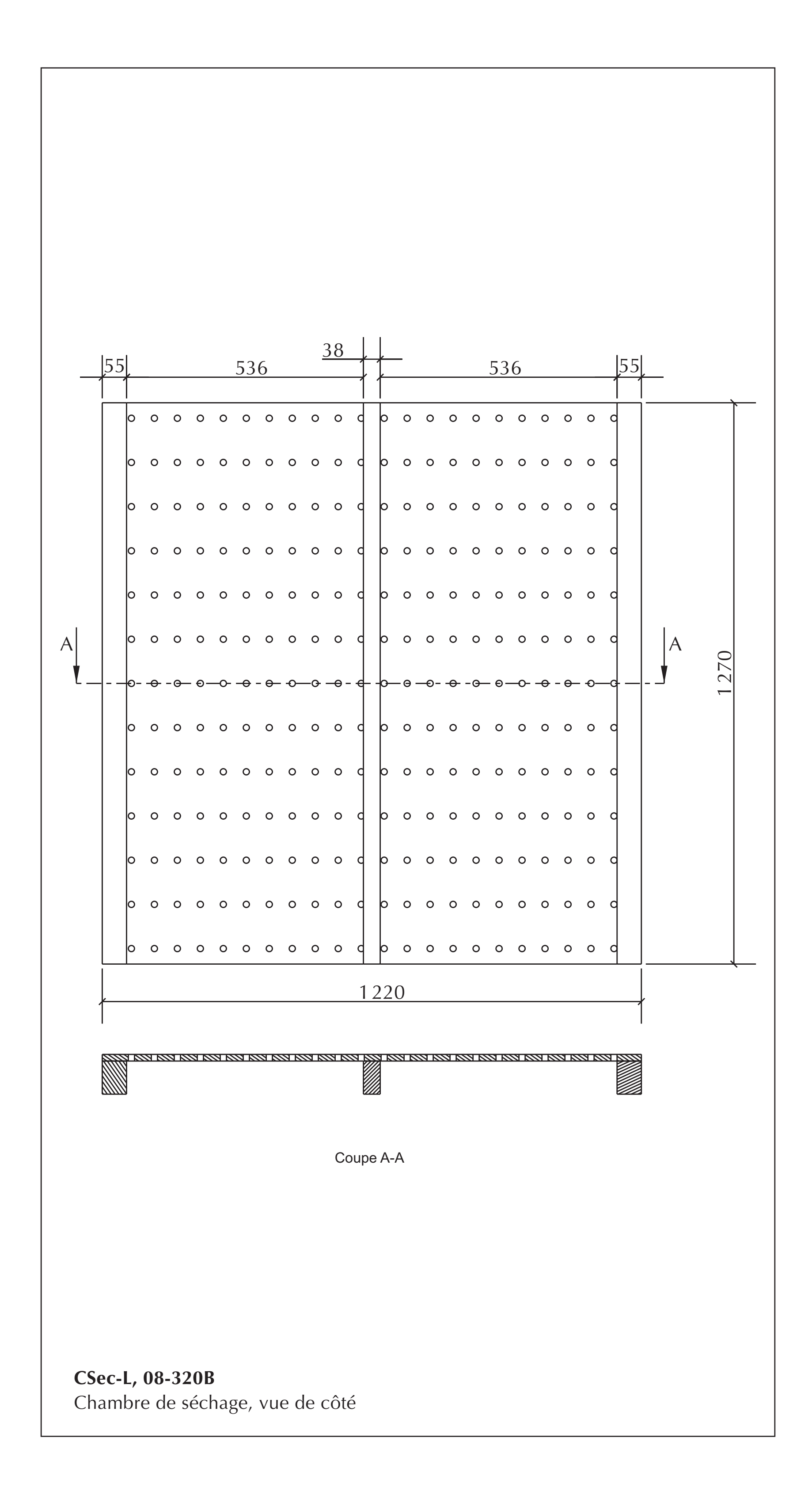
CSec-L, 08-313
Chambre de séchage, panneau de côté extérieur



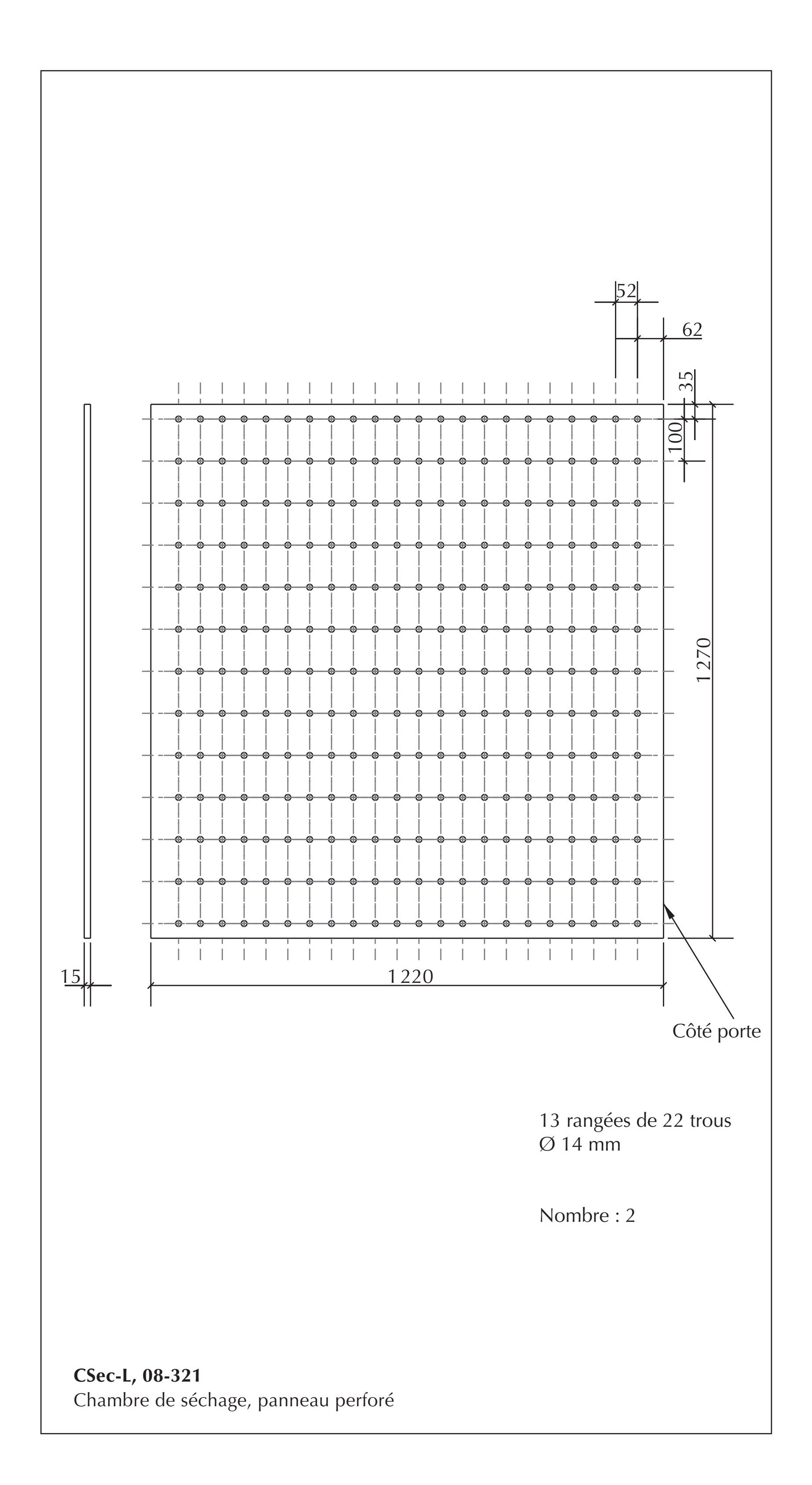
CSec-L, 08-314
Chambre de séchage, panneau arrière



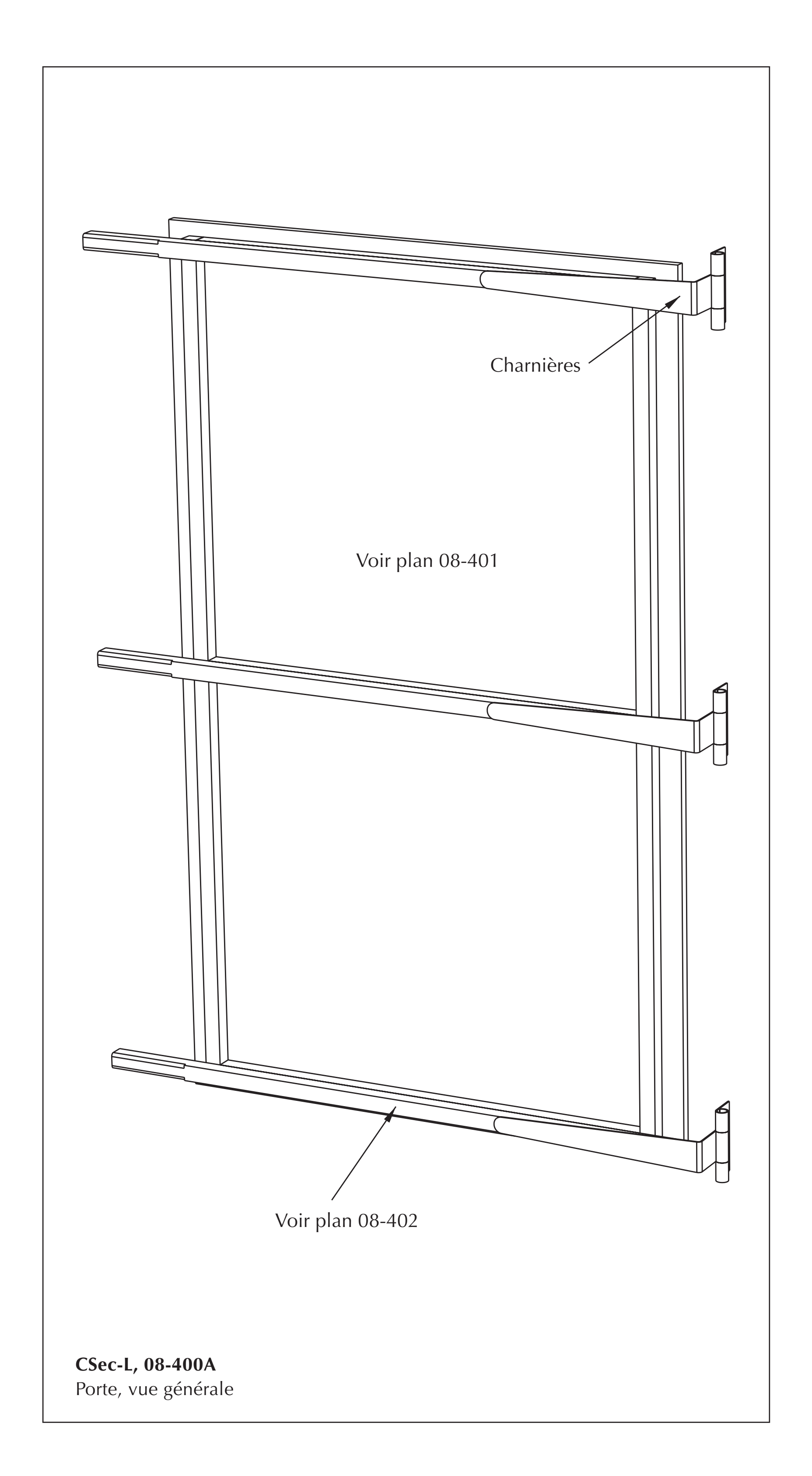
CSec-L, 08-320A
Chambre de séchage, vue sans les parois extérieures



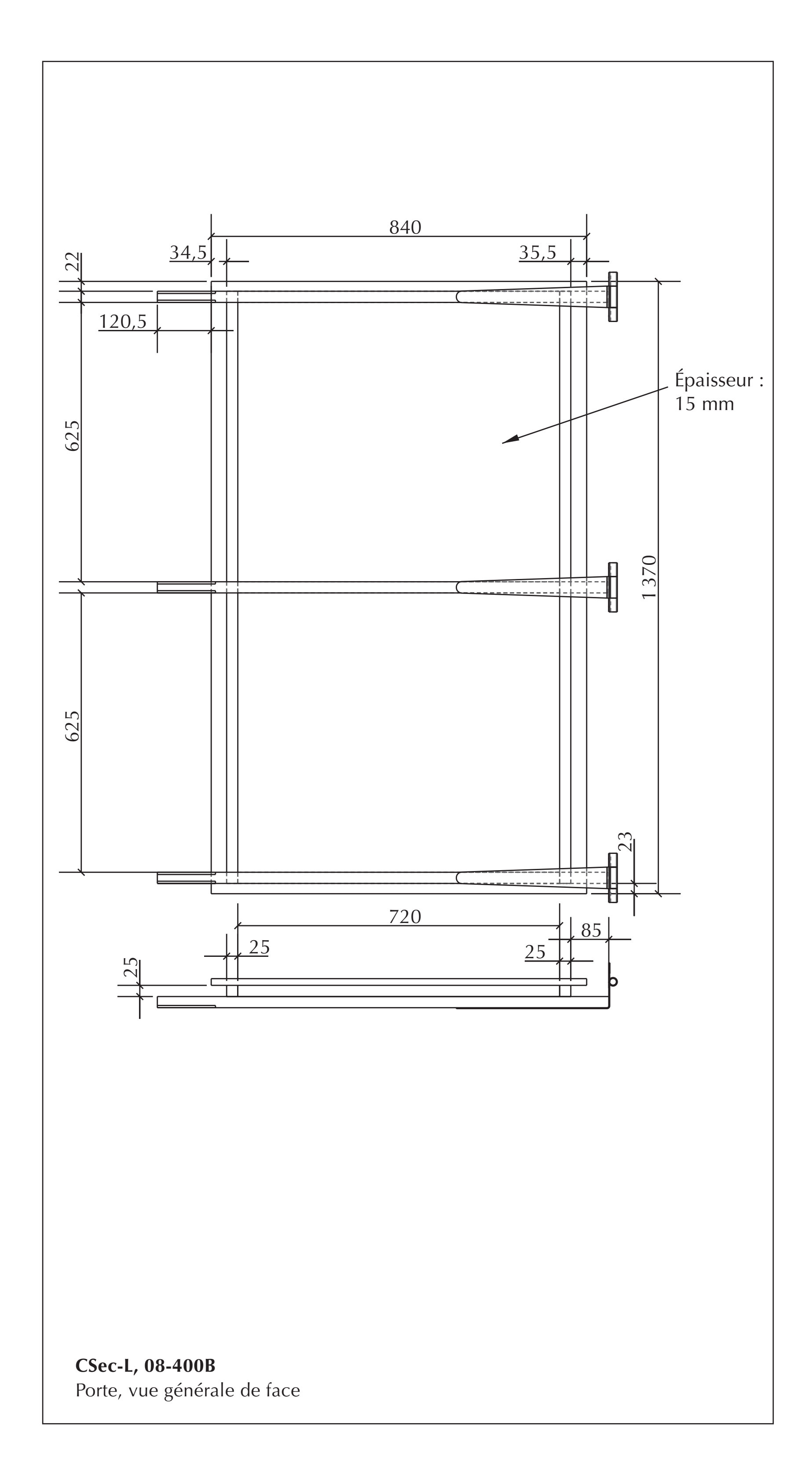
CSec-L, 08-320B
Chambre de séchage, vue de côté



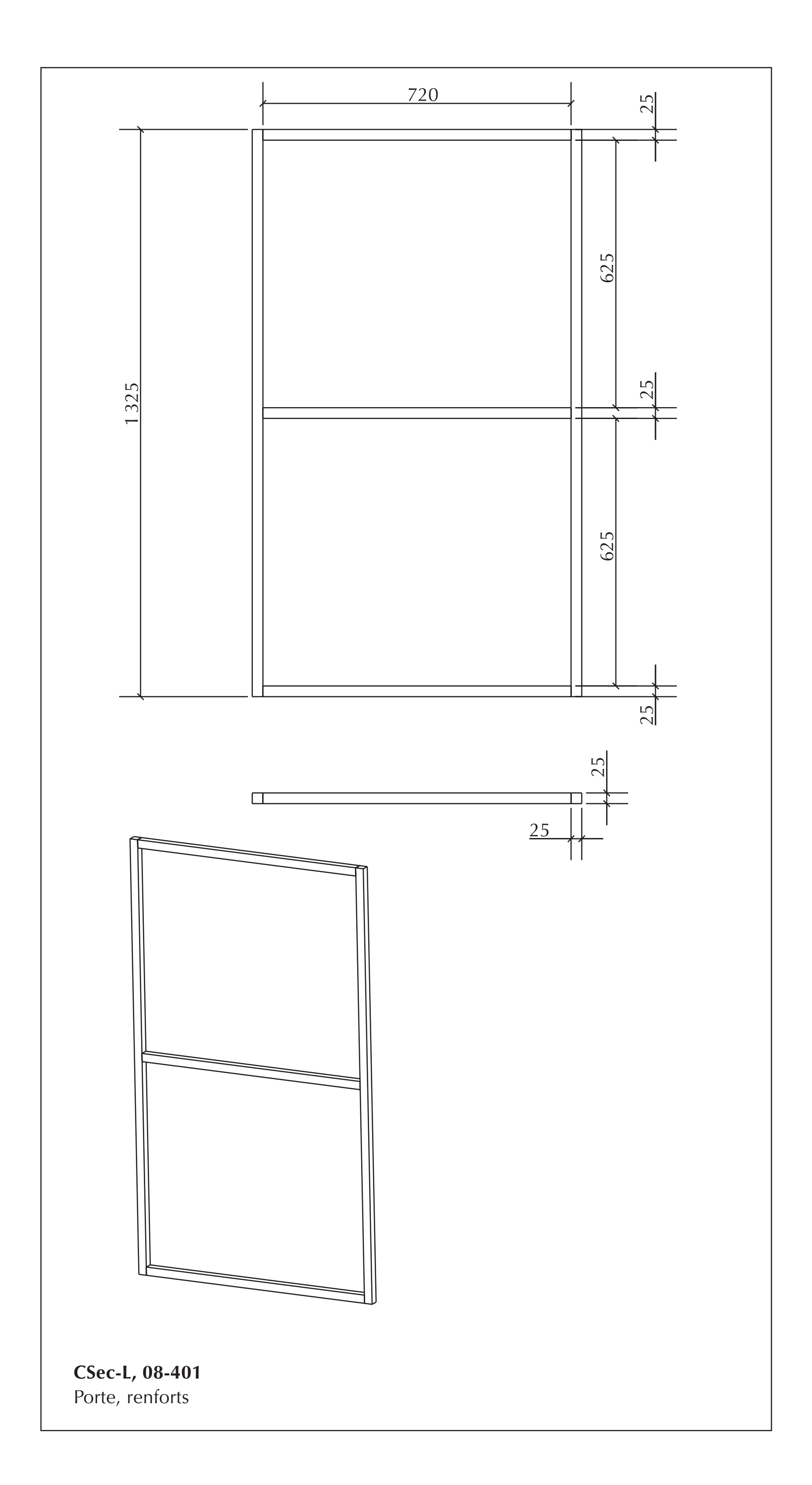
CSec-L, 08-321
Chambre de séchage, panneau perforé



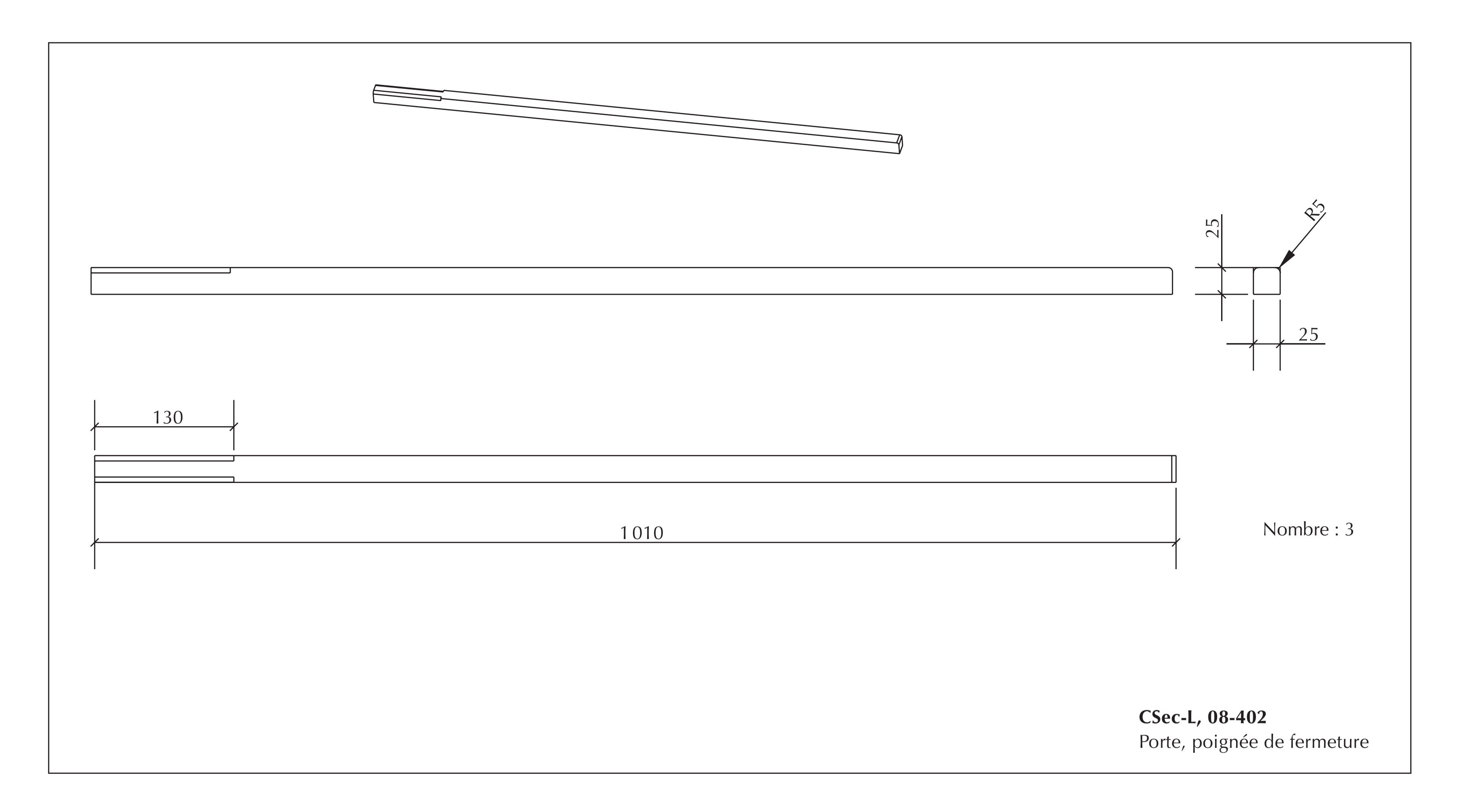
CSec-L, 08-400A
Porte, vue générale

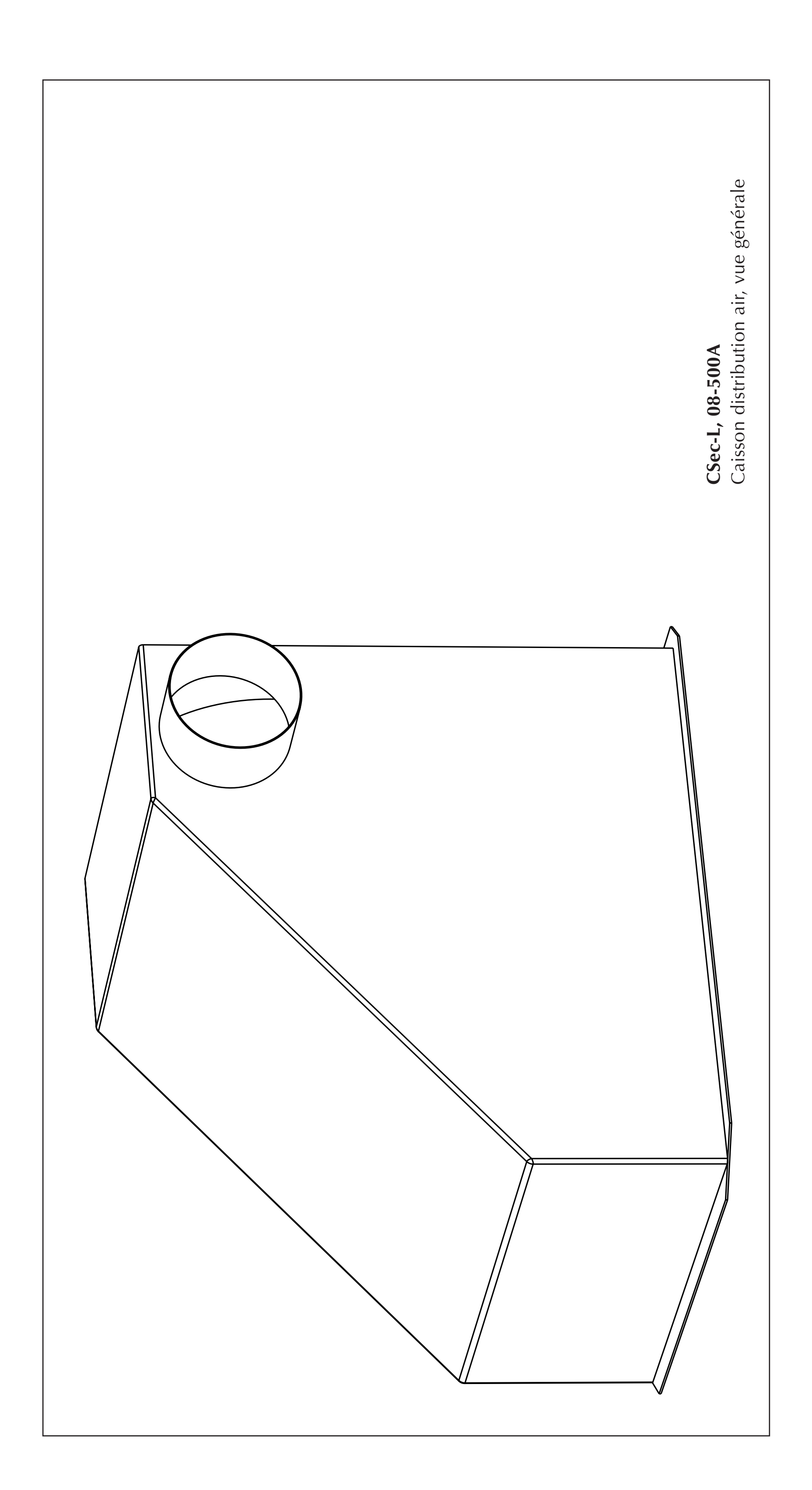


CSec-L, 08-400B
Porte, vue générale de face

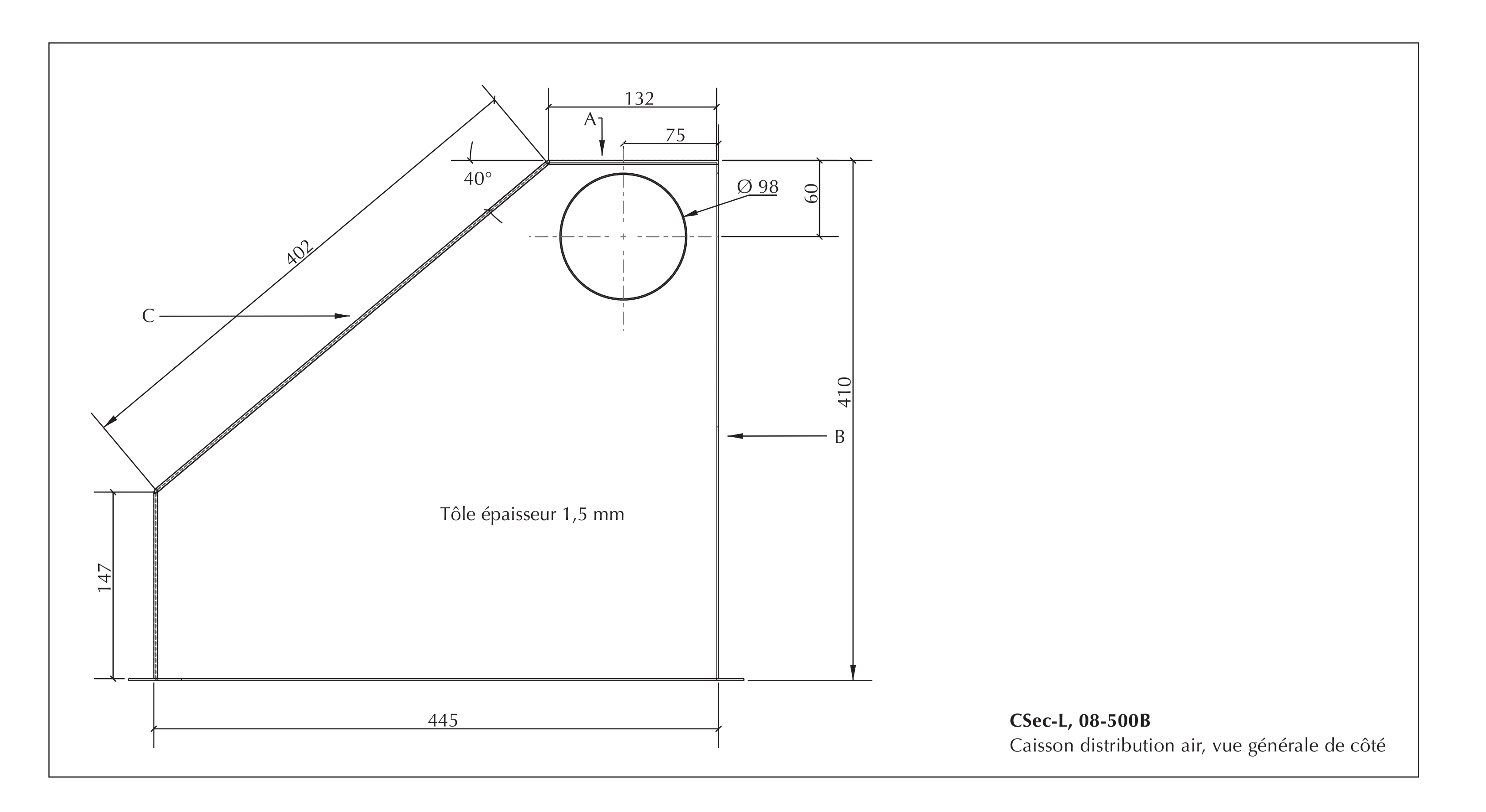


CSec-L, 08-401
Porte, renforts

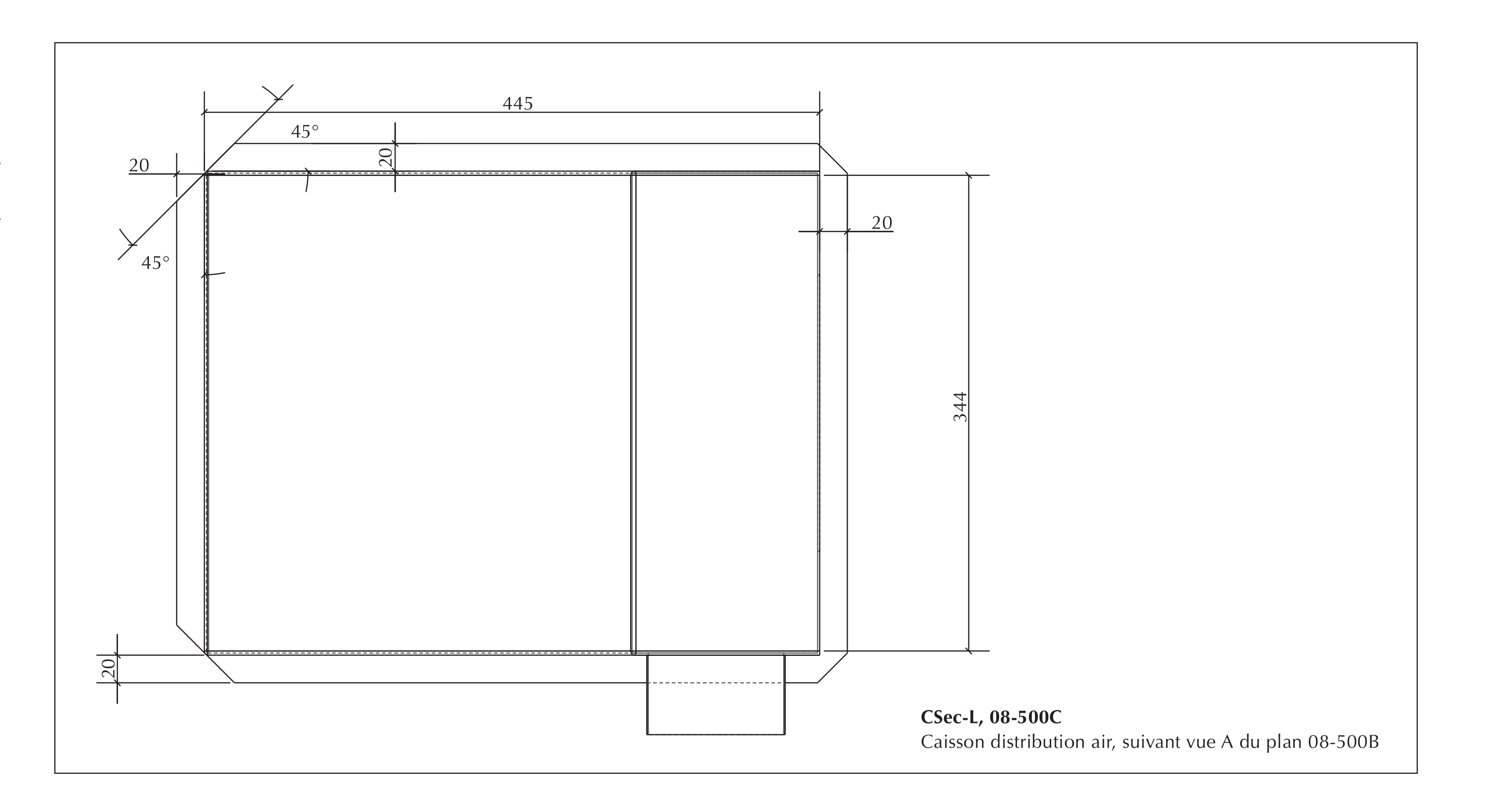

R5
25
25
130
1 010
Nombre : 3
CSec-L, 08-402
Porte, poignée de fermeture



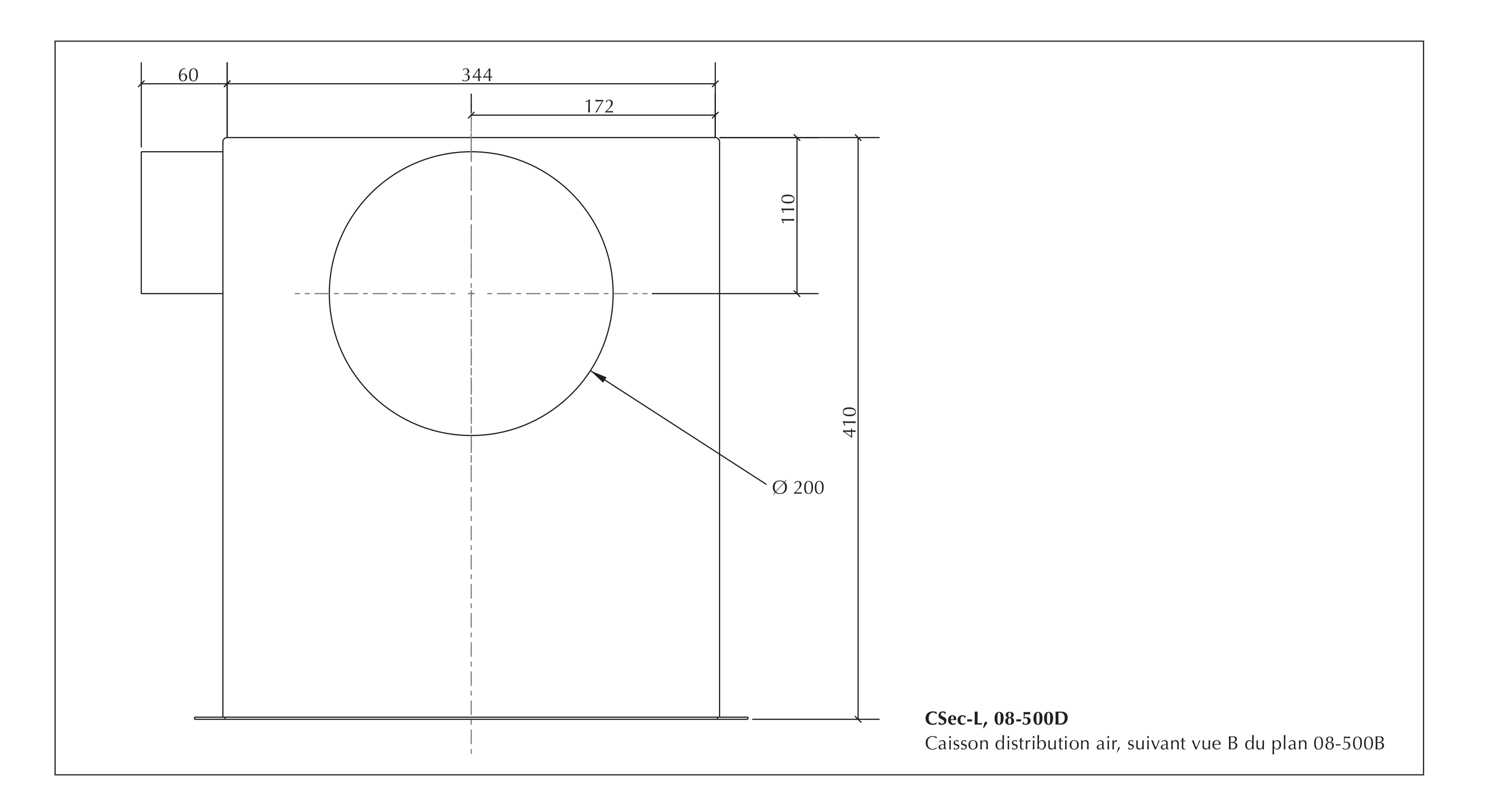
CSec-L, 08-500A
Caisson distribution air, vue générale



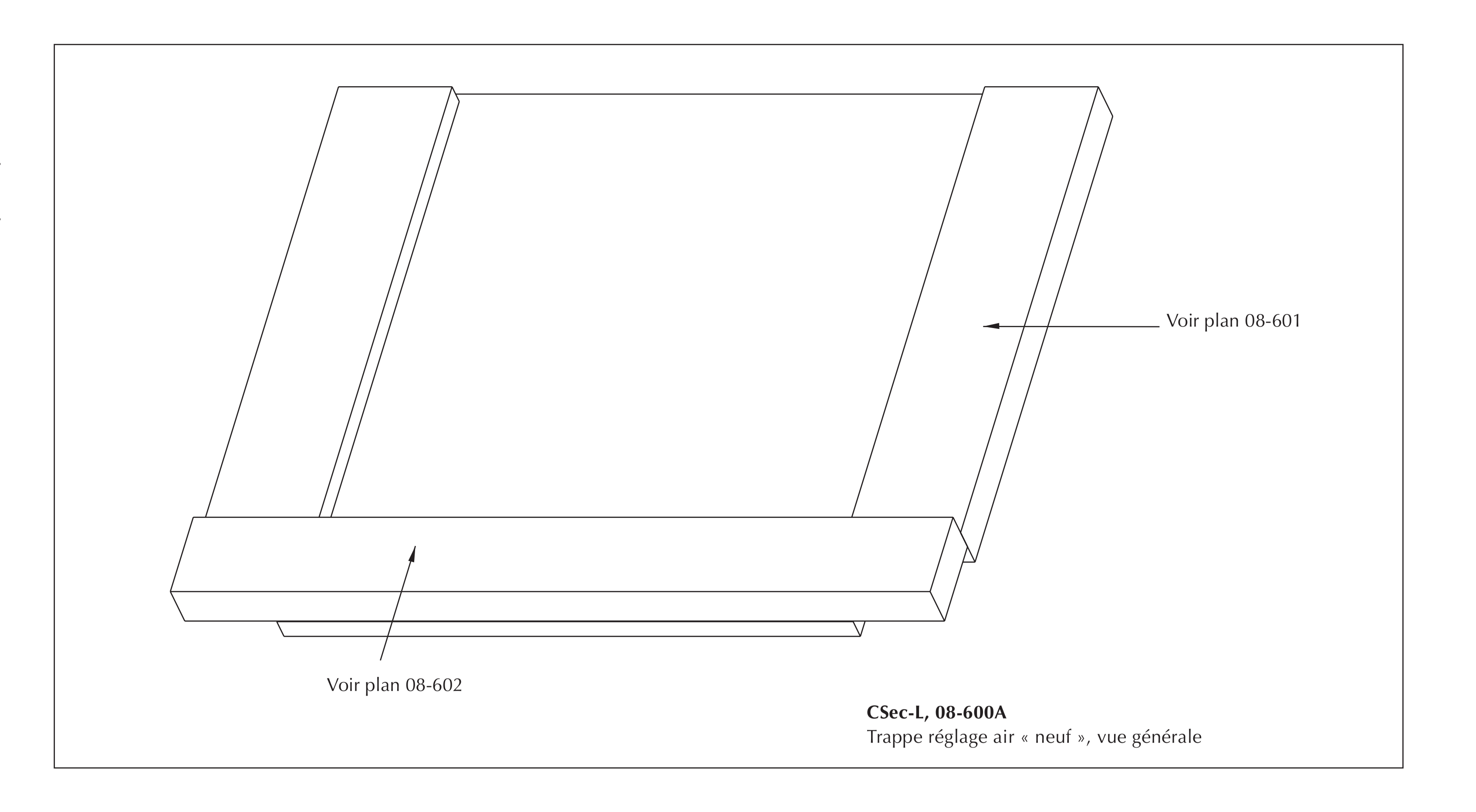
CSec-L, 08-500B
Caisson distribution air, vue générale de côté



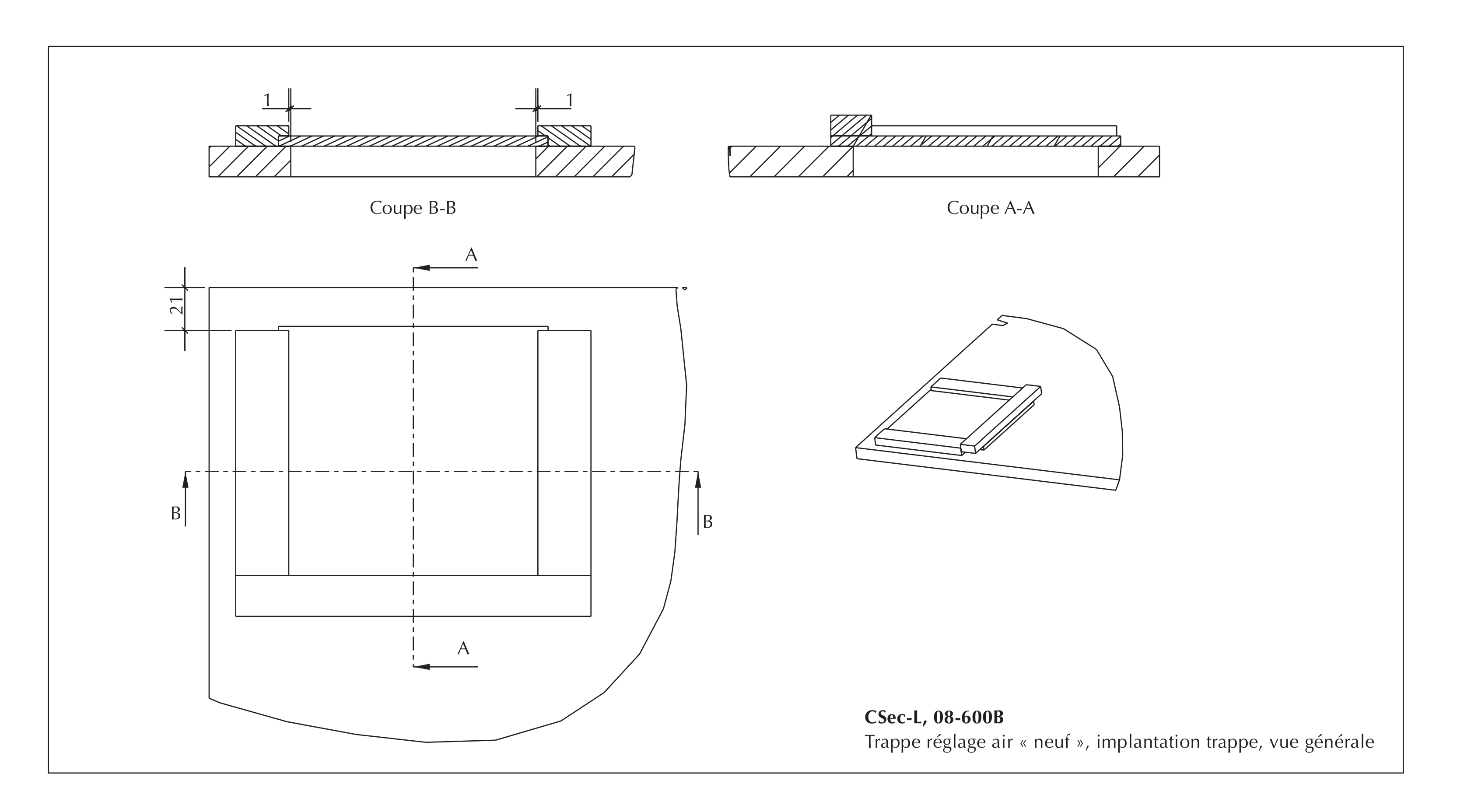
CSec-L, 08-500C
Caisson distribution air, suivant vue A du plan 08-500B



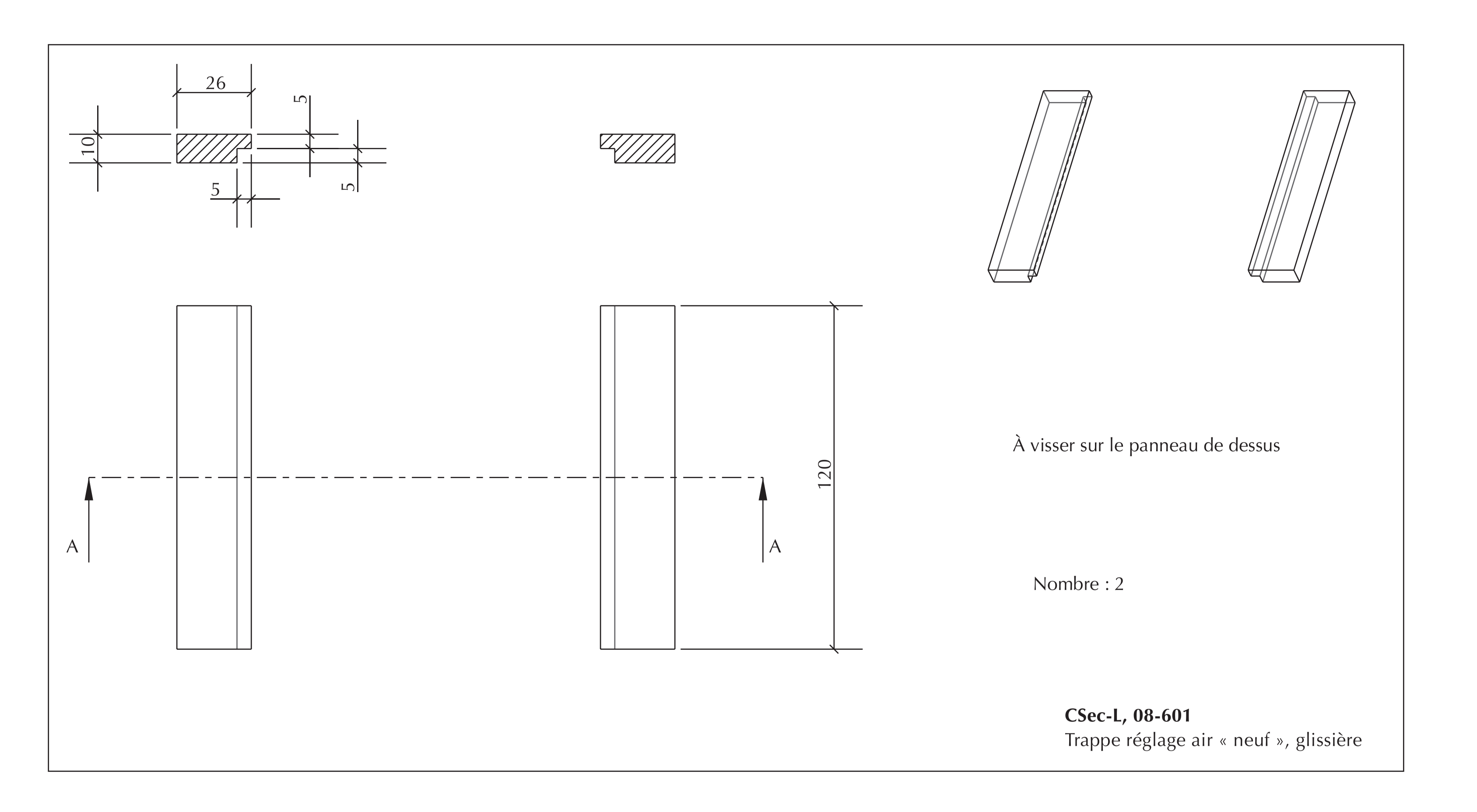
CSec-L, 08-500D
Caisson distribution air, suivant vue B du plan 08-500B

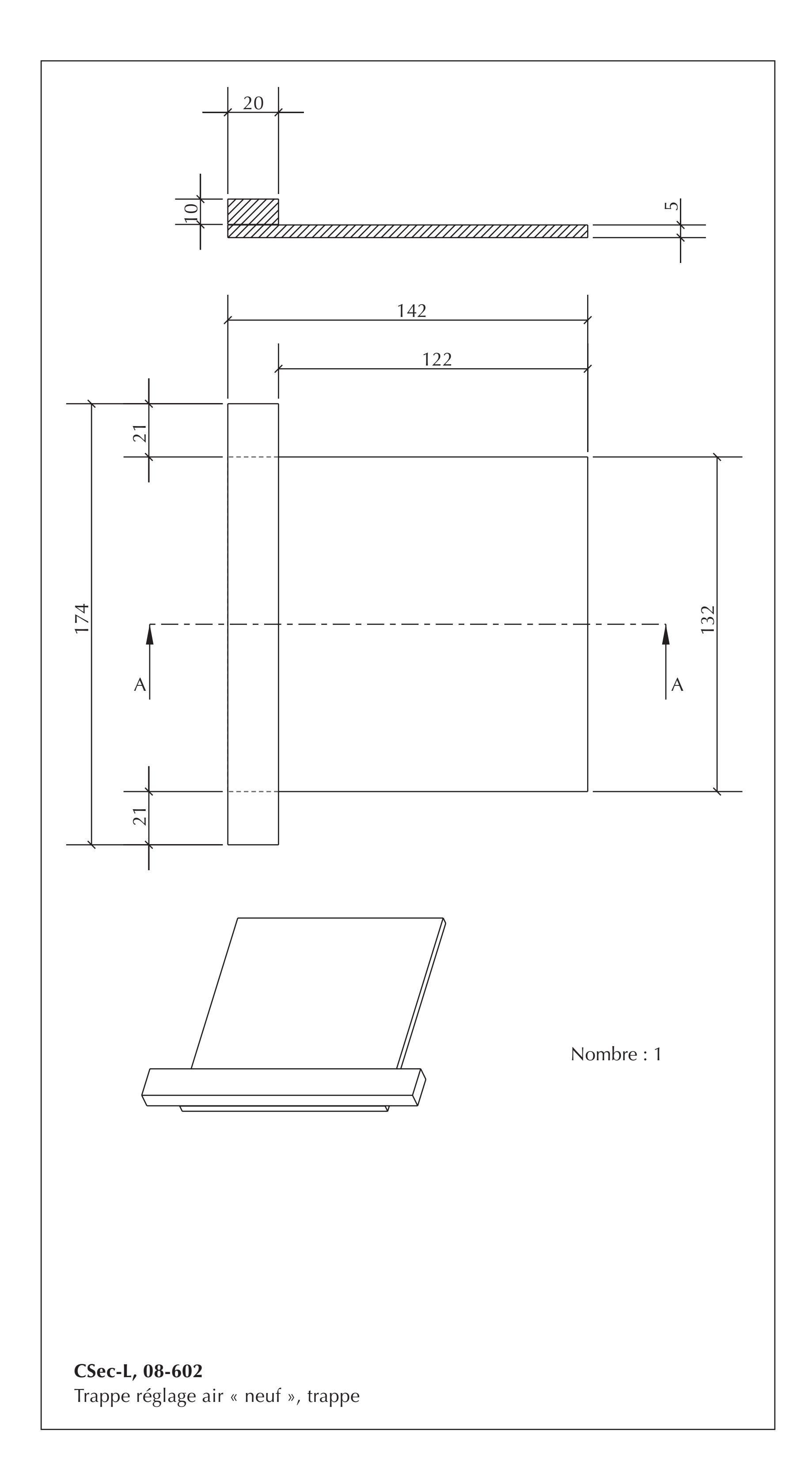


CSec-L, 08-600A
Trappe réglage air « neuf », vue générale



CSec-L, 08-600B
Trappe réglage air « neuf », implantation trappe, vue générale


26
10
5
5
5
120
A
A
À visser sur le panneau de dessus
Nombre : 2
CSec-L, 08-601
Trappe réglage air « neuf », glissière



CSec-L, 08-602
Trappe réglage air « neuf », trappe



Édition et corrections
Isabelle Bonnevie, 34 Montpellier

Mise en pages
Éditions Quæ

Impression
Louis Jean imprimeur, 05 Gap

Dépôt légal : n° 223 - Juin 2009

La saison de récolte des mangues est courte et la production généralement abondante. Aussi est-il intéressant de pouvoir valoriser ce fruit en le séchant, ce qui nécessite la mise au point et la diffusion de procédés et d'équipements spécifiques.

Cet ouvrage est la synthèse de travaux menés par une équipe pluridisciplinaire du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) et de ses partenaires, avec les acteurs de la filière de la mangue séchée au Burkina Faso, pays pionnier dans ce domaine. Il présente les étapes de la transformation de la mangue, depuis l'approvisionnement en fruits jusqu'à la commercialisation du produit séché. L'analyse de chaque opération est détaillée : principes théoriques, équipements mis en œuvre, bonnes pratiques d'utilisation et d'hygiène, gestion de la qualité, rendement « matière » et consommation d'énergie, besoin en main-d'œuvre… Outre des fiches techniques, le lecteur trouvera dans ce guide le schéma d'une unité de séchage de mangues, les plans de fabrication d'un séchoir ventilé ainsi qu'un manuel de production utile pour préparer, suivre et faire le bilan d'une campagne de séchage.

Ce guide s'adresse aux responsables de petites et moyennes entreprises qui souhaitent améliorer les conditions de fonctionnement de leurs unités de production ainsi qu'aux entrepreneurs et porteurs de projets désireux de créer une unité de séchage de mangues.

Michel Rivier, ingénieur en génie mécanique en poste au Cirad, est spécialisé en recherche et développement (R&D) de procédés et de technologies de transformation agroalimentaire pour la valorisation des productions agricoles dans les pays du Sud.

Jean-Michel Méot, ingénieur agroalimentaire, docteur en génie des procédés, est spécialiste en conduite et équipements de séchage. Il travaille au Cirad sur l'optimisation du séchage par modélisation couplée.

Thierry Ferré, ingénieur agroalimentaire, est spécialiste en innovation et développement dans l'agroalimentaire. Ses travaux au Cirad portent en particulier sur les systèmes agroalimentaires localisés.

Mathieu Briard, ingénieur en biologie industrielle, est spécialisé en développement de filières des produits agricoles africains bruts ou transformés à destination des marchés locaux et d'exportation. Il dirige le bureau d'études Acfed (Accompagnement et conseils aux filières équitables et durables).

En couverture : Opération de parage de mangues avant séchage, dans une unité de transformation du Burkina Faso. © Thierry Ferré



partageons les connaissances au profit des communautés rurales

sharing knowledge, improving rural livelihoods

26 €



Éditions Cemagref, Cirad, Ifremer, Inra
www.quae.com



ISBN : 978-2-7592-0341-3



ISSN : 1952-2770
Réf. : 02145